



Filipe Miguel Elias Steinmann Duarte

Licenciado em Ciências da Engenharia Civil

**Influência da adição de óxido de grafeno
em produtos de acabamento de cal
para revestimento de paredes**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil – Perfil Construção

Orientador: Maria Paulina Santos Forte Faria Rodrigues, Professora
Associada, Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade
Nova de Lisboa

Co-orientador: Isabel Maria das Mercês Ferreira, Professora Associada,
Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de
Lisboa

Júri:

Presidente: Doutor Fernando Farinha da Silva Pinho

Arguente: Doutora Maria Rosário Veiga

Vogal: Doutora Maria Paulina S. F. Faria Rodrigues



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Novembro de 2015

“Copyright” Filipe Miguel Elias Steinmann Duarte, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objectivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos os que de alguma forma contribuíram nesta última etapa da minha vida acadêmica.

Primeiro que tudo, um agradecimento à Professora Doutora Paulina Faria pela orientação prestada, assim como pelos esclarecimentos oferecidos e a disponibilidade constante que demonstrou.

Ao Eng.^o Vítor Silva, pela orientação indispensável na parte laboratorial. Pela sua disponibilidade e empenho incansável no esclarecimento de dúvidas e pela forma como sempre garantiu que todos os elementos necessários à execução do trabalho se encontravam disponíveis.

À Professora Doutora Isabel Ferreira, do Departamento de Ciências dos Materiais, e à sua equipa pela ajuda prestada no decorrer do tratamento de resultados que de outra forma seriam difíceis de interpretar. Um agradecimento em particular ao Eng.^o Paulo Duarte pela disponibilidade, simpatia e prontidão no que respeitou à análise dos resultados do FT-IR e do XRD. Um agradecimento também pela disponibilidade do óxido de grafeno que tornou este estudo possível.

À Fradical pelo fornecimento da cal aérea em pasta que foi utilizada nesta dissertação.

Um agradecimento especial à minha família e amigos próximos que me ajudaram muito nesta etapa importante, especialmente nas alturas em que me deparei com contrariedades.

RESUMO

O avanço tecnológico abre novas possibilidades onde anteriormente pareciam haver limitações. Todos os anos novas descobertas permitem ir um pouco mais além do ponto onde a ciência se encontrava limitada e, nesse sentido, o advento dos nanomateriais veio criar uma série de possibilidades extensíveis a vários ramos da ciência. Desde a primeira vez que se sintetizou grafeno em laboratório, nanomaterial sob o qual se foca esta dissertação, que a sua aplicabilidade nos mais variados ramos de pesquisa tem vindo a ser estudada. A engenharia civil conseguiu tirar partido deste novo tipo de material, em grande parte beneficiando das melhorias que este introduz quando usado como aditivo em produtos cimentícios.

Por vários motivos, a necessidade de construção nova reduziu mas por sua vez cresceu a necessidade de intervenções de conservação e reabilitação das construções. No âmbito desta dissertação avalia-se de que forma o óxido de grafeno pode influenciar aspetos relacionados com o desempenho funcional de produtos de acabamento para revestimento de paredes à base de cal aérea, mais vocacionados para edifícios antigos.

Utilizaram-se placas de gesso cartonado como suporte dos produtos de acabamento de revestimento de paredes a avaliar, no caso da caiação e estanhado de cal aérea em pasta. Foram utilizados diferentes teores de óxido de grafeno em cada produto aplicado, de modo a permitir observar a correlação de resultados e a sua evolução, em função do teor de aditivo. Foi possível concluir que, de uma forma muito geral, algumas das características funcionais dos acabamentos foram melhoradas, sendo também possível afirmar que essa melhoria foi consistente com o aumento das percentagens do teor de aditivo. São exemplos a coesão e dureza superficiais e, também, a redução da absorção de água. Outros casos houve em que a adição do óxido de grafeno não se fez notar de nenhuma forma em particular, tal como na fissuração observada nos provetes, bem como no caso da resistência à erosão.

Termos Chave: Cal aérea; Óxido de grafeno; Caiação; Estanhado de cal; Produto de acabamento; Revestimento de parede; Reabilitação; Caracterização experimental.

ABSTRACT

Technological improvements open new possibilities where before only limitations seemed to be. Every year new discoveries allow science to move forward and, in that regard, the discovery of nanomaterials has created a range of possibilities extendable to several branches of science. Since the first time graphene oxide was synthesized in a laboratory, nanomaterial which influence is the main focus of this thesis, its applicability in several research fields has been studied. Civil engineering has been taking advantage of this new kind of material, greatly benefiting from improvements that it can introduce when used as an additive in cementitious products.

For various motives, the necessity of new construction has decreased, but there has been an increase in building conservation and rehabilitation interventions. In this thesis, the study will be based on the influence of graphene oxide on functional performance of aerial lime based finishing products for walls, commonly used in old buildings.

A plasterboard was used as the substrate where the air lime finishing products were applied. Several different percentages of graphene oxide were used in each product to allow the observation of results, as a function of the additive quantity. It was possible to conclude that, in a general way, some of the functional characteristics of the finishing wall products were improved. That improvement was consistent with the increase in oxide graphene percentage. Examples of this can be the superficial cohesion and water absorption. There were other cases where the graphene oxide addition did not manifest itself in any particular way, such as the cases of the shrinkage observed in samples, as well as resistance to abrasion.

Keywords: Air lime; Graphene oxide; Lime paint; Lime thin coating; Finishing wall coating; Rehabilitation; Experimental characterization.

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Enquadramento	1
1.2 Objetivos e Metodologia	2
1.3 Estrutura do Trabalho	2
2 NANOMATERIAIS NA CONSTRUÇÃO	5
2.1 Introdução	5
2.2 Óxido de Grafeno	8
2.3 Viabilidade da Utilização de Nanomateriais	9
3 PRODUTOS DE ACABAMENTO	11
3.1 Cal Aérea	11
3.2 Caracterização	12
3.3 Características Funcionais	12
3.4 Resistência a Ações Físico-Mecânicas	13
3.5 Resistência a Fenómenos Higrotérmicos	14
3.6 Caso Misto - Ação Mecânica e Higroscópica	15
3.7 Síntese	15
4 CAMPANHA EXPERIMENTAL	17
4.1 Materiais Utilizados	17
4.2 Faseamento da Campanha Experimental	17
4.2.1 Preparação de Produtos de Acabamento	17
4.2.2 Aplicação de Produtos de Acabamento, Condições de Cura e Corte dos Provetes	18
4.3 Ensaio Realizados	20
4.3.1 Suscetibilidade à Fissuração	20
4.3.2 Resistência ao Desgaste	20
4.3.3 Resistência ao Arrancamento	21
4.3.4 Resistência à Flexão	22

4.3.5	Coesão Superficial	23
4.3.6	Dureza Superficial	24
4.3.7	Permeabilidade ao Vapor de Água	24
4.3.8	Absorção de Água a Baixa Pressão	26
4.3.9	Espectrofotometria de Infra-Vermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)	28
4.3.10	Difração de raios X (XRD).....	29
4.3.11	Ângulo de Contato	29
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5.1	Considerações Iniciais	31
5.2	Avaliação da Fissuração.....	31
5.3	Resistência ao Desgaste	32
5.4	Resistência ao Arrancamento.....	33
5.5	Resistência à Flexão	34
5.6	Coesão Superficial.....	35
5.7	Dureza Superficial	36
5.8	Permeabilidade ao Vapor de Água	37
5.9	Absorção de Água a Baixa Pressão	38
5.10	FT-IR.....	41
5.11	XRD	43
5.12	Ângulo de Contacto	45
5.13	Síntese.....	45
5.14	Tendências	47
6	CONCLUSÕES	51
6.1	Conclusões Gerais	51
6.2	Conclusões Principais	52
6.3	Estudos Futuros.....	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57
	ANEXO - Valores individuais dos ensaios efetuados e cálculos auxiliares	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tamanho de partícula de vários materiais	5
Figura 4.1 - Placa de gesso cartonado com produtos de acabamento aplicados.....	18
Figura 4.2 – Processo de corte dos provetes.....	19
Figura 4.3 – Lupa binocular e ensaio de fissuração.....	20
Figura 4.4 – Ensaio de erosão/desgaste.....	21
Figura 4.5 – Ensaio de arrancamento	22
Figura 4.6 – Ensaio de flexão e esquema AutoCad	23
Figura 4.7 – Ensaio de coesão superficial	23
Figura 4.8 – Ensaio de dureza superficial	24
Figura 4.9 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água.....	25
Figura 4.10 – Ensaio de absorção de água a baixa pressão	27
Figura 4.11 – Ensaio de FT-IR	29
Figura 4.12 – Ensaio de ângulo de contacto.....	30
Figura 5.1 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de resistência ao desgaste na pintura e no estanhado	32
Figura 5.2 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de arrancamento na pintura e no estanhado	33
Figura 5.3 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de flexão na pintura e no estanhado	35
Figura 5.4 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de coesão superficial na pintura e no estanhado	36
Figura 5.5 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de dureza superficial na pintura e no estanhado	36
Figura 5.6 – Valores médios do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e de espessura da camada de ar de difusão equivalente.....	37
Figura 5.7 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água a baixa pressão para a pintura e o estanhado	39

Figura 5.8 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água a baixa pressão ao fim de 60 minutos	40
Figura 5.9 – Espectros de FT-IR da cal em pasta e de OG puro	42
Figura 5.10 – Espectros de FT-IR obtidos para os vários provetes	42
Figura 5.11 – Espectros de XRD das amostras de pintura, de estanhado e de apenas cal aérea em pasta	45
Figura 5.12 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de arrancamento (Pintura à esquerda e estanhado à direita)	47
Figura 5.13 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de flexão (Pintura em cima e estanhado em baixo).....	48
Figura 5.14 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de coesão superficial (Pintura à esquerda e estanhado à direita).....	49
Figura 5.15 – Reta de tendência dos resultados para o ensaio de dureza superficial (Pintura)	49
Figura 5.16 – Reta de tendência dos resultados para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água (Pintura)	50
Figura 5.17 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de absorção de água a baixa pressão (Pintura à esquerda e estanhado à direita)	50
Figura A1.1 - Retas de transferência de vapor de água	65

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 – Influência da adição de OG nas características mecânicas de produtos cimentícios	7
Quadro 2.2 – Influência da adição de OG nas trabalhabilidade de produtos cimentícios.....	10
Quadro 4.1 – Nomenclatura para identificação dos provetes	19
Quadro 5.1 – Resultados do ensaio de fissuração	32
Quadro 5.2 – Valores médios e desvio-padrão de fissuração por retração, resistência ao desgaste e resistência ao arrancamento	45
Quadro 5.3 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de resistência à flexão	46
Quadro 5.4 – Valores médios e desvio-padrão dos ensaios de dureza e coesão superficiais ..	46
Quadro 5.5 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água	46
Quadro A1.1 – Ensaio de avaliação da fissuração	59
Quadro A1.2 - Ensaio de erosão e desgaste	59
Quadro A1.3 – Ensaio de arrancamento	60
Quadro A1.4– Cálculos auxiliares	60
Quadro A1.5 – Ensaio de flexão	60
Quadro A1.6– Ensaio de coesão superficial	60
Quadro A1.7– Cálculos auxiliares	61
Quadro A1.8 – Ensaio de dureza superficial	61
Quadro A1.9 - Valores da medição da espessura dos provetes	62
Quadro A1.10 - Valores da medição da área superficial de ensaio	62
Quadro A1.11 - Cálculos auxiliares	62
Quadro A1.12- Valores registados nas medições do ensaio de permeabilidade ao vapor de água	63
Quadro A1.13- Cálculos auxiliares	64
Quadro A1.14 - Valores das leituras nos tubos de Karsten	66
Quadro A1.15 - Valores dos níveis nos tubos de Karsten (Fim de 1h)	67
Quadro A1.16 - Médias dos níveis nos tubos de Karsten ao longo do ensaio	67

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento

O uso de nanomateriais nos mais variados ramos da engenharia tem vindo a aumentar ano após ano. Atualmente, têm vindo a permitir soluções de base microscópica que de alguma forma têm ultrapassado soluções anteriores baseadas em processos macroscópicos. Um exemplo deste fenómeno seria a aditivação de produtos cimentícios com fibras versus a aditivação com este novo tipo de materiais que, ao contrário do que acontece com as fibras cuja atuação se dá ao nível macroscópico, atuam ao nível microscópico. Isto quer dizer que acabam por não ser componentes extra que são incluídos, mas sim componentes que reagem com a matriz cimentícia e que dela passam a fazer parte.

Entre os nanomateriais encontram-se os com base em carbono e, entre estes, o óxido de grafeno. No ramo da engenharia civil já se testaram alguns destes tipos de materiais. No entanto, tanto quanto a bibliografia disponível permite saber, no que toca aos produtos de acabamento à base de cal aérea, pouco ou nada ainda se sabe. Faz sentido então inferir de que forma o óxido de grafeno (OG) pode contribuir para a melhoria das características funcionais deste tipo de produtos. Com base em bibliografia consultada pode-se prever, de certa forma, o tipo de alterações que podem ocorrer nessas características, uma vez que se sabe que tipo de material o OG é e que tipo de melhorias ele geralmente introduz quando incluído em produtos cimentícios. Falta no entanto saber como ele poderá reagir com os constituintes dos produtos baseados em cal aérea.

No contexto deste estudo e tendo em conta as tendências atuais do mercado da construção, não só em território nacional mas também a nível internacional, que apontam para uma ressurgência de intervenções relacionadas com a reabilitação de edifícios, considerou-se importante basear a investigação em torno de materiais que geralmente estão associados a esses tipos de intervenção. Daí a escolha dos produtos de acabamento à base de cal aérea, em alternativa, por exemplo, a sistemas de pintura com tintas plásticas. Assim, convém definir os aspetos funcionais que caracterizam um produto de acabamento geralmente utilizado em reabilitação, bem como o tipo de evolução favorável inerente a cada um desses aspetos. Se, por um lado, é favorável um aumento da permeabilidade ao vapor de água, no caso da absorção de água no estado líquido o ideal seria ver uma diminuição do parâmetro. Fazer este tipo de análise é importante, no sentido em que no fim permite avaliar se o OG funciona ou não como um potenciador das características funcionais. Este estudo pretende então contribuir de alguma forma para preencher a falta de conhecimento que existe neste momento relativamente a este assunto.

1.2 Objetivos e Metodologia

O objetivo principal desta dissertação é contribuir para inferir qual a influência da adição de OG em produtos de acabamento à base de cal aérea. Para atingir este objetivo, através da adição de diferentes percentagens bastante reduzidas deste material neste tipo de produtos pretende-se ver qual a evolução, quer positiva ou negativa, das características funcionais desses produtos. Entre elas conta-se a sua permeabilidade ao vapor de água, capacidade de absorção de água no estado líquido, resistência a vários tipos de solicitação, tais como flexão simples, arrancamento ou desgaste, bem como as alterações em termos de dureza, coesão superficial e tendência para a abertura de fendas.

- Procedeu-se assim a: Análise e ensaio das características físicas de dois produtos de acabamento (leite de cal para caiação e pasta de cal para acabamento estanhado), aditivados com diversas percentagens de OG, ao fim de 28 dias de cura;
- Análise dos resultados obtidos nos ensaios;
- Correlação dos resultados obtidos nos ensaios com as características e as percentagens do OG, que podem ter levado às alterações observadas.

1.3 Estrutura do Trabalho

Tendo em conta a natureza do trabalho desenvolvido e a forma como este foi faseado ao longo do estudo, optou-se por estruturar este texto da seguinte forma:

Capítulo 1 – Introdução, incluindo o enquadramento do tema, bem como os seus objetivos e a estruturação deste texto.

Capítulo 2 – Nanomateriais na Construção - Capítulo onde se desenvolvem aspectos relacionados com a bibliografia que serve de base a este estudo, nomeadamente alguns conceitos-chave relacionados com o OG, bem como dados relevantes acerca de documentação que aponta o uso deste aditivo no ramo da engenharia civil. Neste capítulo abordam-se também alguns aspetos associados à viabilidade do uso do OG e algumas das vantagens e desvantagens a ele associadas.

Capítulo 3 – Produtos de Acabamento – Capítulo onde se desenvolve uma breve explicação acerca dos produtos de acabamento utilizados neste estudo, abordando as matérias-primas que os compõem e onde se enumeram as suas características funcionais mais importantes, tendo em conta o contexto desta dissertação.

Capítulo 4 – Campanha Experimental - Capítulo onde se abordam os materiais utilizados no decorrer do estudo, bem como o faseamento que foi adotado, indicando todas as etapas por ordem cronológica. Este capítulo aborda também os ensaios que foram realizados, explicando todos os pressupostos e métodos que foram seguidos no decorrer da campanha experimental.

Capítulo 5 - Resultados e Discussão - Secção onde se analisam os resultados obtidos na campanha experimental, verificando as alterações que ocorreram e procurando explicações para os dados que resultaram dos ensaios.

Capítulo 6 – Conclusões - Apresenta, de forma sintetizada, os pontos mais importantes do trabalho, incluindo também algumas sugestões para estudos futuros. Nesta secção também se procura avaliar se se deu resposta aos objetivos que se propuseram no início deste texto;

Referências Bibliográficas - Secção onde se listam as referências utilizadas na criação deste texto.

Anexos – Secção onde se apresentam os resultados individuais dos ensaios realizados, de forma a possibilitar a continuidade da investigação.

2 NANOMATERIAIS NA CONSTRUÇÃO

2.1 Introdução

A introdução dos nanomateriais no léxico dos investigadores tem sido gradual, mas acelerada, na medida em que este tipo de material apresenta características que o tornam ideal para uma série de aplicações que se enquadram numa vasta gama de áreas da ciência. Assim, existe um grande interesse no estudo deste tipo de material e de como este pode ajudar a impulsionar determinadas áreas de estudo. Até à data, os nanomateriais já foram empregues em diversas áreas da ciência, sejam elas a medicina, a biotecnologia, a mecânica, entre muitas outras. Nanomaterial representa uma definição muito generalizada que abrange muitos tipos de materiais. Como tal é importante referir que existem várias categorias de material em que uma das suas dimensões é inferior a 100 μm . A categoria nanomaterial com base em carbono começa com os chamados nanotubos de carbono e nanopartículas, nos quais existe pelo menos uma dimensão com um tamanho entre os 10 e os 90 μm . De seguida encontra-se o OG, caracterizado por uma dimensão de partícula situada no intervalo entre 0 e 9 μm , seguido do grafeno, o nanomaterial com a menor dimensão de partícula, cuja menor dimensão está compreendida entre 0,1 e 1 μm . De seguida apresenta-se a figura 2.1, onde se pode observar a hierarquia que rege as dimensões deste tipo de materiais.

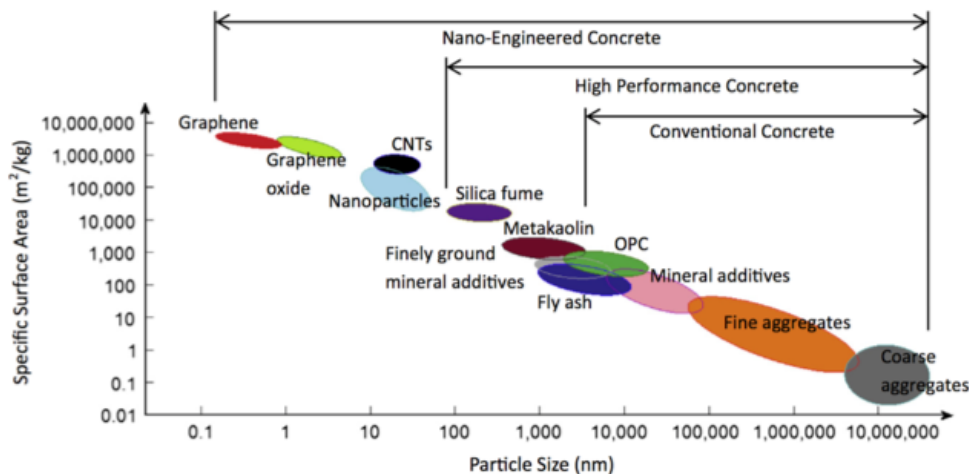


Figura 2.1 – Tamanho de partícula de vários materiais (Chuah et. al, 2014)

O uso de produtos à base de OG está já amplamente documentado em artigos científicos sob diversos propósitos, sendo o fortalecimento de matrizes cimentícias um dos mais destacados (Gong et. al, 2015, Shenghua et. al, 2013 e Pan et. al, 2015). Até à disseminação dos nanomateriais como possíveis alternativas para o aumento da rigidez mecânica de produtos cimentícios, a menor escala com que se tinha trabalhado tinha sido essencialmente a das fibras, mais concretamente, as fibras de celulose que podem servir de aditivo em produtos cimentícios. As fibras fortalecem a matriz de

cimento porque permitem o transporte de cargas através de fissuras e poros, efetuando assim um *bypass* em pontos de descontinuidade, onde a integridade estrutural do produto cimentício poderia ser posta causa, provocando a sua rutura. É de notar que dado que as fibras encontram o seu propósito no que toca à criação de uma ponte que permite encaminhar cargas, mesmo que se formem fissuras, estas não impedem essa fissuração e, para além disso, apenas contribuem para a resistência mecânica quando a solicitação traciona ou flete a matriz cimentícia, trabalhando assim da mesma forma que um cabo na estrutura de uma ponte, por exemplo.

Neste aspeto os nanomateriais representam um *upgrade*, face às fibras até hoje utilizadas, pois segundo a sua natureza, acabam por atuar ao nível microscópico, querendo isto dizer que os nanomateriais podem atuar ao nível dos poros mais pequenos e, dado que não se trata de aditivos que fazem a ponte entre descontinuidades, ou seja estruturas longas em que uma dimensão é bastante superior às outras duas, mas sim aditivos que se incorporam na matriz cimentícia como se dela fizessem parte, os nanomateriais podem reforçar a resistência mecânica não só à tração e flexão, como também à compressão (Pan et. al, 2015). Grande parte do sucesso dos nanomateriais no fortalecimento de matrizes cimentícias é devido à sua ação ao nível da microestrutura, tal como foi referido. No entanto é importante abordar a forma como essa ação se desenrola. O ganho de presa de um produto cimentício dá-se ao longo do tempo, através de reações químicas que alteram a sua estrutura, atuando ao nível dos cristais de hidratação. Os nanomateriais, ao contrário dos produtos tradicionalmente utilizados como aditivos neste tipo de casos, atuam ao nível dos cristais de hidratação, alterando o seu formato. Num produto cimentício tradicional, os cristais de hidratação apresentam um formato alongado semelhante ao de uma agulha. Por outro lado, num produto do mesmo género mas aditivado com nanomateriais, existem alterações significativas, não só com a introdução do nanomaterial, mas também com o aumento do seu teor em percentagem nesse produto, sendo que os cristais de hidratação passam a apresentar, não só, um formato de flor, como também uma tendência para se aglomerarem em conjuntos entrelaçados de cristais (Shenghua et. al, 2013). Muitas destas reações químicas são possíveis graças a grupos funcionais do oxigénio que serão referidos mais em pormenor no seguimento deste texto.

O que decorre desta utilização de nanomateriais em produtos cimentícios são resultados consistentes e unânimes ao longo de toda a bibliografia, sendo que o uso de OG como aditivo pode levar a aumentos de resistência mecânica de 50% no caso da flexão (Gong et. al, 2015), 78% no caso da tração (Shenghua et. al, 2013) e 30% no caso da compressão (Pan et. al, 2015). Aumentos do valor do módulo de Young também se encontram documentados, mas não de forma consistente, sendo que nalguns casos podem atingir melhorias muito significativas que podem alcançar os 50% (Horszczaruk et. al, 2015) e noutros casos, melhorias tão ligeiras que podem ser desprezadas (Pan et. al, 2015). Apresenta-se de seguida o quadro 2.1, elaborado no decorrer da pesquisa bibliográfica que foi realizada e onde se expõem alguns dos resultados anteriormente falados.

Quadro 2.1 – Influência da adição de OG nas características mecânicas de produtos cimentícios

Referência	OG		Argamassa	w/c	Provetes		Cura
	Dispersão	Teor (%)			Formato	Dimensão (mm)	
Lv et al., 2013	Sonicação (325W - 1h)	0,01-0,05	Areia + Cimento Portland	0,37	Prisma/Alter	40x40x160/100x70x70+2x50x70x70	20°C e 95% HR
Horszczaruk et al., 2015	Sonicação (Método Hummers)	0,03	Areia + Cimento Portland	0,6	-	-	20°C
Pan et al., 2015	Sonicação (Método Hummers)	0,05	Areia + Cimento Portland (ASTM C 150)	0,5	Prisma/Cubo	15x15x80/15x15x15	Banho hidróxido de cálcio
Gong et al., 2015	Sonicação (Método Hummers)	0,03	Areia + Cimento Portland (ASTM C 150)	0,5	Cilindro	23.5x47	Banho de água saturada com cal a 20°C
Chuah et al., 2014	-	-	-	-	-	-	-

Quadro 2.1 – Influência da adição de OG nas características mecânicas de produtos cimentícios (Cont.)

Referência	Incremento Resist. Mecânica (28 dias - %)			Aumento Módulo Young (GPa)
	Tração	Flexão	Compressão	
Shenghua et al., 2013	78,6	60,7	38,9	-
Horszczaruk et al., 2015	-	-	-	1 a 10 para 5 a 20
Pan et al., 2015	-	41-59	15-33	3.48 para 3.70
Gong et al., 2015	-	50	46	-
Chuah et al., 2014	OG reforçou os compostos mecanicamente, de forma muito substancial e consistente.			O artigo reporta o ligeiro aumento em Pan et al., 2015

Assim, não existem de momento dúvidas acerca da mais valia deste tipo de soluções, sendo que se torna necessário avaliar se as desvantagens que estes trazem são comportáveis, tendo em conta o benefício que se pode obter.

No âmbito da pesquisa bibliográfica que se levou a cabo para a elaboração deste texto, verificou-se que o uso de nanomateriais como aditivos em sistemas para acabamento de

revestimentos de paredes ainda não se encontra tão documentado na bibliografia. O seu uso já foi estudado no que toca à possível melhoria das propriedades anticorrosivas e antivegetativas, sendo que nesses casos, foi estudado o seu impacto como protetor anticorrosivo de superfícies metálicas pintadas e como protetor antivegetativo utilizado em tintas para cascos de embarcações (Krishnamoorthy, 2014 e Topsakal et. al, 2012).

2.2 Óxido de Grafeno

No contexto desta dissertação, o nanomaterial em estudo é o OG. Trata-se de um nanomaterial que deriva da oxidação da grafite através de uma das muitas adaptações do método de Hummer original e, como tal, acaba por ser uma rede hexagonal de carbono sob a forma de uma folha microscópica extremamente fina (Chuah et. al, 2014). O método de Hummer referido é composto por várias fases que compreendem a oxidação, processo que cria grupos funcionais de oxigénio que conferem ao nanomaterial características que mais tarde se revelarão muito importantes, seguido de purificação e exfoliação do grafeno. A diferença entre o OG e a grafite, material de onde provém, prende-se com o facto de o OG microscopicamente ser composto por uma folha de uma única camada, enquanto a grafite apresenta diversas camadas na sua estrutura. Para além disso, o OG, como consequência da oxidação que lhe dá origem, apresenta na sua constituição oxigénio com grupos funcionais tais como o carboxil, hidroxil e epoxi (Horszczaruk et. al, 2015). A presença destes grupos é extremamente importante, dado que criam repulsão electrostática que leva a que a dispersão do OG em água seja muito mais estável do que, por exemplo, a dispersão do grafeno não oxidado. Este facto leva a que o número de aplicações do OG na ciência seja maior, uma vez que essa dispersão mais estável e homogénea torna o material num candidato a muitas aplicações onde não teria lugar, caso essa dispersão não ocorresse. Há que ter em conta também que os grupos de oxigénio presentes no OG potenciam a ocorrência de reações químicas que podem ser extremamente importantes, nomeadamente, no caso da adição de OG a um produto cimentício, onde esse tipo de reações químicas irão contribuir para fundir o OG na própria matriz do cimento, a um nível microscópico.

A escolha deste nanomaterial em particular para este estudo está relacionada com algumas das suas características que se prevê serem possíveis potenciadoras de alguns aspetos relacionados com o desempenho funcional de produtos de acabamento. Em primeiro lugar, o OG possui uma elevada superfície específica, um muito reduzido tamanho de partícula, o que leva a crer, pelo menos teoricamente, que poderá melhorar as características relacionadas com a absorção de água no estado líquido, nomeadamente minimizando essa ocorrência. Para além disso, a sua elevada superfície específica poderá levar a um aumento da dureza superficial do material, uma vez que as pequenas partículas do OG em adição poderão preencher espaços vazios na composição da pasta de cal e água, formando um produto mais sólido e compacto. Essa melhoria de dureza superficial poderá ser extensível a outras características com ela relacionadas, tais como a coesão superficial e talvez as resistências ao arrancamento e à erosão. No âmbito deste estudo irá fazer-se uma análise qualitativa

das alterações que se dão nas características funcionais de dois produtos de acabamento à base de cal aérea e, para além disso, irá investigar-se se essas alterações terão sido motivadas pela adição do OG, sendo que caso se chegue à conclusão que foram, se irá tentar correlacionar o tipo de características que o OG possui que poderão levar às alterações observadas.

2.3 Viabilidade da Utilização de Nanomateriais

A utilização de materiais deste género acarreta algumas desvantagens. Por um lado, este tipo de material ainda representa um investimento monetário avultado, dado que a sua síntese em laboratório é ainda dispendiosa, pouco ecológica e morosa, não possibilitando produção em larga escala. Este problema é tanto mais gravoso quanto maior for o volume de material a ser aditivado, o que faz com que o uso deste tipo de solução em peças de betão de elevado volume tenha que ser alvo de um estudo económico, sendo de prever que, neste momento, o investimento apenas se justifique em casos muito específicos. Por outro lado nos casos em que se pretende aditivar uma tinta ou outro produto para acabamento de revestimento de parede com este tipo de produto, o consumo de nanomaterial é decidido não com base em volume, mas sim em área a cobrir, fazendo com que não seja necessário um critério tão apertado no que toca à viabilidade da solução.

Outra das desvantagens dos nanomateriais prende-se com a sua elevada superfície específica, o que significa que teoricamente é necessária muito mais água para hidratar todas as faces deste tipo de material e assim, num produto cimentício aditivado desta forma, por forma a manter uma trabalhabilidade aceitável, será necessária uma quantidade substancialmente maior de água de amassadura. Em pequena escala este aumento da água de amassadura poderá não ser significativa, mas tal como em tudo o que está relacionado com a Engenharia Civil, a larga escala tem de ser tida em conta. Muitas vezes até deve ser tida mais em conta do que a pequena escala, uma vez que representa a situação mais desfavorável e, nesse caso, este aumento da quantidade de água de amassadura pode traduzir-se num aumento extremamente substancial das quantidades de material a ter em conta para uma obra. Isso pode traduzir-se em termos de aumento de orçamento, pois será necessária uma maior alocação de capital para transporte, armazenamento e utilização em obra. Mais importante que a questão do consumo de água propriamente dita estará a alteração de características que esse aumento na razão água/ligante implica, condicionando diretamente o desempenho dos produtos. Este aumento de água de amassadura está também reportado na bibliografia e segundo Gong (2014) que efetuou um ensaio de mesa de espalhamento em argamassa de areia com cimento Portland, aditivada com 0.03% de OG. O diâmetro obtido nesse ensaio foi reduzido em cerca de 35%, o que denota uma diminuição grande da trabalhabilidade da argamassa. De seguida apresenta-se o quadro 2.2, cujo conteúdo inclui informação relacionada com alterações na trabalhabilidade aquando da adição de OG em produtos cimentícios. Note-se que o quadro 2.2 faz referência aos mesmos artigos científicos referidos no quadro 2.1, assim, a preparação dos provetes e os materiais utilizados, bem como as suas dosagens são as mesmas que as indicadas nesse quadro.

Quadro 3.2 – Influência da adição de OG nas trabalhabilidade de produtos cimentícios

Referência	Teor OG (%)	Ensaio Efetuado	Trabalhabilidade
Pan et al., 2015	0,05	SEM*, TEM**, espalhamento, velocidade ultrassons, adsorção nitrogénio	O diâmetro obtido no teste de espalhamento diminuiu em 41.7%.
Gong et al., 2015	0,03	Espalhamento, TGA***, MIP****	O diâmetro obtido no teste de espalhamento diminuiu em 34.6%.
Chuah et al., 2014	-	-	Nanomateriais possuem uma grande superfície específica, assim é necessária uma quantidade de água muito maior para a hidratação de uma argamassa aditivada desta forma.

* Scanning electron microscopy; ** Transmission electron microscopy; *** Thermogravimetric analysis; **** Mercury intrusion porosimetry

3 PRODUTOS DE ACABAMENTO

3.1 Cal Aérea

Como anteriormente referido, esta dissertação tem como foco central o tema da influência dos nanomateriais, e particularmente do OG, em produtos de acabamento de revestimentos de paredes à base de cal aérea, vocacionados para a reabilitação de edifícios. Não poderia deixar de se referir que os produtos à base de cal aérea têm grande importância, dado que se trata de um material de excelência que tem sido amplamente divulgado como uma das melhores alternativas para este tipo de intervenções, uma vez que fazia parte da maior parte das soluções originais. Por isso pensa-se ser importante abordar um pouco este aspeto, referindo algumas características importantes da cal aérea, nomeadamente o facto de a cal ser proveniente de pedra calcária com uma elevada percentagem de carbonato de cálcio na sua constituição e um baixo teor de impurezas, sendo que geralmente se considera que um teor de impurezas aceitável será aquele que se encontrar abaixo dos 5%.

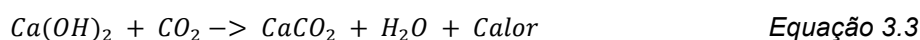
Para se obter a cal que é vulgarmente utilizada na confecção do tipo de produtos sobre os quais incide o estudo nesta dissertação, esta é sujeita a um ciclo de transformação que altera as suas propriedades e a transforma numa matéria-prima que pode ser utilizada convenientemente. O ciclo é descrito ao pormenor em Matias et. al (2014), sendo que o seu primeiro passo compreende a cozedura dos calcários com baixo teor de impurezas, calcários esses que foram diretamente extraídos da rocha e cozidos posteriormente a temperaturas da ordem dos 900°C. Dessa cozedura resulta cal viva e dióxido de carbono, sendo que a cal viva não representa ainda um estado da cal que a torna própria para uso na confecção de materiais de construção. Esta primeira etapa do processo encontra-se expressa na equação 3.1.



Posteriormente, a cal viva obtida no passo anterior é apagada com água e o resultado desse processo é uma reação exotérmica que termina com a obtenção de hidróxido de cálcio, também vulgarmente conhecido como cal hidratada ou cal apagada. Esta parte do processo encontra-se demonstrada na equação 3.2.



Para terminar o processo, dá-se a carbonatação, durante a qual, na presença da água, a cal apagada, ou hidróxido de cálcio, endurece por reação com o dióxido de carbono na atmosfera. Este passo pode ser observado de seguida na equação 3.3.



3.2 Caracterização

Um produto de acabamento representa a última interface entre o elemento opaco e o ambiente exterior, servindo assim como barreira protetora que protege o elemento construtivo de ações muito correntes e, em geral, pouco gravosas dado que no caso de ações de maior intensidade que possam colocar em risco a integridade da estrutura, o papel protetor do acabamento deixa de ser relevante. Entre essas ações encontra-se a da água da chuva e do vento com partículas em suspensão, por exemplo. Assim sendo, e dado que se trata da parte visível e exposta, o produto de acabamento acaba por ter associados requisitos muito específicos no que toca ao seu desempenho como protetor do substrato e à sua capacidade para manter a sua aparência ao longo do seu tempo de vida útil.

Neste estudo utilizaram-se dois tipos de produto de acabamento, sendo eles a caiação e o estanhado à base de cal aérea. Estes tipos de produtos estão geralmente associados, não só, a tipos de intervenção mais tradicionais, como também a todos os tipos de intervenção que apesar de serem considerados modernos, têm uma ligação direta com as técnicas e materiais tradicionais, tal como é o caso da reabilitação de edifícios. Por motivos que serão referidos mais à frente, estes produtos à base de cal aérea possuem características que os tornam opções de excelência para esse tipo de aplicações em detrimento, por exemplo, dos produtos de acabamento mais modernos como as tintas plásticas. Uma nota de atenção pode ser feita para o caso do estanhado, que pode ser facilmente confundido com um barramento. No entanto o estanhado é definido pela ausência do filler ou areia fina, que geralmente se encontra presente no barramento, sendo apenas constituído por uma pasta de cal espessa que é aplicada diretamente no suporte com brocha.

No geral, este tipo de acabamentos são caracterizados visualmente pela sua brancura e homogeneidade de tom, sendo fisicamente considerados extremamente permeáveis ao vapor de água, trabalháveis, inteiramente compatíveis com alvenarias antigas e deformáveis. No entanto também bastante permeáveis à água líquida e sujeitos a desgaste.

3.3 Características Funcionais

Uma vez que o presente estudo se foca essencialmente em produtos de acabamento geralmente associados à prática da reabilitação urbana, considera-se importante desenvolver um pouco a ligação que existe entre esta dissertação e essa temática. Este tipo de exposição torna-se vital pois ajuda, não só a explicar o porquê de se terem selecionado certos ensaios laboratoriais para a campanha experimental, como também a interpretar corretamente os resultados obtidos nesses mesmos ensaios. Quer isto dizer que assim que se percebe quais são as características funcionais dos produtos de acabamento e a forma como geralmente estas são manipuladas para resultar em produtos mais eficientes, o processo de avaliação dos resultados torna-se mais intuitivo. A título de exemplo, funcionalmente, um produto de acabamento para um edifício centenário, por razões que serão descritas mais em pormenor no seguimento deste texto, deverá ser permeável ao vapor de

água e, como consequência, resultados positivos associados ao ensaio de permeabilidade ao vapor de água serão aqueles que não apontem para uma redução significativa dos valores associados a esta característica funcional.

Existem diversas características funcionais inerentes aos produtos de acabamento. Naturalmente estas têm geralmente caráter físico, uma vez que o produto de acabamento constitui a interface exposta que protege os elementos opacos verticais das ações exteriores. Assim, cabe ao produto de acabamento a tarefa de proteger o elemento construtivo de possíveis ações mecânicas e das ações relacionadas com fenómenos higrótérmicos.

3.4 Resistência a Ações Físico-Mecânicas

Ações físico-mecânicas são todas aquelas que possam colocar em causa a integridade física ou estética do elemento construtivo. A parte física pode englobar a componente da integridade estrutural. No entanto, geralmente não se confere essa responsabilidade ao produto de acabamento, sendo que neste contexto, quando se refere integridade física se mencionam apenas características mais estéticas e de integridade superficial, do que estruturais. Nomeadamente, um elemento opaco vertical poderá sofrer danos quando solicitado de forma tangencial por um material rugoso. Daí a importância da avaliação da resistência do produto de acabamento à erosão e ao desgaste, bem como a avaliação da sua coesão superficial e a sua resistência ao arrancamento. Um aumento dos valores associados a este tipo de características é geralmente considerado uma evolução positiva e desejável. Outro exemplo a ter em conta são as ações de punçoamento ou esforços concentrados numa pequena área, esforços esses que podem conduzir à criação de concavidades inestéticas na superfície do produto de acabamento ou, em casos mais graves, a destacamento de parte do produto em si, situação esta que também é válida no caso da solicitação tangencial com um material rugoso. Estas ações pontuais podem ser motivadas por qualquer tipo de utilização banal do espaço no interior dos elementos opacos verticais, ou nas suas imediações. São exemplos disso os casos de vértices ou arestas de móveis que podem embater na superfície do elemento opaco. Assim se explica a realização do ensaio de dureza superficial que permite estudar a influência do OG como potenciador ou pelo menos não condicionante deste tipo de característica.

Naturalmente que a proteção dos elementos opacos é tanto mais exigente quanto maior for o grau de utilização do espaço onde estes elementos se encontram, bem como o tipo de utilização desse espaço. Outro fator a ter em conta é a proteção interior ou exterior de um destes elementos, sendo que no exterior haverá mais oportunidades para colocar em causa a integridade estética do elemento, uma vez que este se encontrará exposto aos elementos naturais, bem como a situações mais perigosas tais como a movimentação de veículos automóveis. Em alguns desses casos, será preferível optar por acabamentos em pedra ou outro tipo de soluções construtivas que já se encontram fora do enquadramento teórico deste estudo.

3.5 Resistência a Fenómenos Higrotérmicos

O tipo de edifício que habitualmente é sujeito a intervenções de reabilitação possui uma série de características que fazem com que o seu estado higrotérmico possa ser substancialmente diferente daquele que geralmente está presente em construções mais recentes. Primeiro que tudo, um edifício antigo possui uma estrutura diferente, sendo que por vezes não possui propriamente fundações, sendo apenas implantado diretamente sobre o terreno e servindo as suas paredes como elementos estruturais, dado que a estrutura reticulada em betão armado representa um método construtivo pertencente à história mais recente da engenharia civil. Essa solução construtiva antiquada pode ser problemática, ainda que por vezes a base da parede que contacta com o terreno seja de uma alvenaria menos porosa e capilar. Assim sendo, torna-se imperativo que as paredes sejam suficientemente grossas, por forma a suportar as cargas inerentes ao peso próprio do edifício, às sobrecargas que nele atuam, bem como possíveis solicitações acidentais ou relacionadas com os elementos da natureza. Esta conjugação de fatores levam a que as paredes, sendo muito mais grossas que o habitual e contactando diretamente com o terreno, tenham uma tendência grande para a absorção capilar de água proveniente deste. Assim, o conceito de secagem das paredes adquire grande importância uma vez que a permanência de água no seu interior é tudo menos desejável.

A forma como se criam condições propícias a essa secagem envolve muitos fatores, entre os quais se inclui, por exemplo, a promoção de um esquema de ventilação que crie um ambiente higrotérmico favorável à secagem dos elementos opacos verticais. No entanto, neste texto é mais importante realçar que outra das formas de evitar a inibição dessa secagem é através da aplicação de produtos de acabamento que sejam permeáveis ao vapor de água. Estes produtos, para além de estarem em conformidade com o visual estético que se pretende para este tipo de intervenção, também têm de permitir que a água que inicialmente era líquida e que percolou para o interior das paredes, possa sair pela sua superfície, mas desta vez sob a forma de vapor de água. É de referir também que já se encontra vastamente documentado que os produtos à base de cal aérea são extremamente permeáveis ao vapor de água, sendo do consenso geral que por norma este tipo de produtos não constituem uma barreira à passagem da água sob a forma de vapor. Com base nisto, certamente que será interessante saber se o OG poderá inibir de alguma forma essa passagem do vapor de água.

No sentido inverso ao caso da permeabilidade ao vapor de água encontra-se o caso da absorção de água no estado líquido. Se no caso da água que entrava em estado líquido pela base das paredes em contacto direto com o terreno e que tinha que sair sob a forma de vapor de água pelos paramentos das paredes, o objetivo era facilitar ao máximo essa migração, no caso da água líquida que pode incidir nos paramentos dos elementos opacos verticais, quer sob a forma de chuva ou proveniente de qualquer outra fonte, o objetivo é dificultar ao máximo que essa água possa penetrar na superfície do produto de acabamento e, conseqüentemente, infiltrar-se no interior da parede.

Daí a necessidade de avaliar a absorção de água a baixa pressão, mas não só; a avaliação da fissuração superficial do produto de acabamento é também muito importante, uma vez que se o material tiver tendência a fendilhar demasiado, esse fenómeno levará à criação de muitas zonas de descontinuidade na superfície da parede, zonas essas que servirão de entradas preferenciais para a água em estado líquido se infiltrar sem dificuldade, comprometendo assim a estanquidade do acabamento da parede.

3.6 Caso Misto - Ação Mecânica e Higroscópica

Outro problema inerente aos fenómenos higroscópicos prende-se com o facto de estes poderem conduzir ao desgaste de determinadas zonas. Este fenómeno dá-se porque a migração da água através das paredes pode levar à deposição de sais que se encontram nela dissolvidos, sais esses que se alojam à superfície do produto de acabamento, ou possivelmente entre este e camadas mais interiores do revestimento e mesmo da parede, e que irão cristalizar e dissolver à medida que as condições de humidade relativa oscilam acima e abaixo de determinados valores de equilíbrio, que desencadeiam esse tipo de reações. Essa cristalização e dissolução dos sais leva a um desgaste do material que compõe o acabamento da parede, fazendo com que, caso a cristalização dos sais se dê entre o acabamento e a parede em si, se criem bolhas, podendo levar ao destacamento do acabamento em casos mais avançados de deterioração. Caso a cristalização se dê na superfície do produto de acabamento, ou seja, fora da parede, não haverá esse problema relacionado com o desgaste do acabamento, sendo que os problemas que daqui decorrem serão mais estéticos e por isso não serão abordados neste texto.

Desta forma, esta ação conjuga a natureza higroscópica dos sais que a desencadeiam e a natureza mecânica que faz com que ela seja problemática, devido aos ciclos de dissolução e cristalização dos sais acima referidos. Nesse sentido, une-se a utilidade dos ensaios de permeabilidade ao vapor de água, de forma a inferir se o OG não reduz significativamente a migração do vapor de água pelos paramentos dos elementos opacos verticais, ao ensaio de coesão superficial que pode, por exemplo, indicar se o OG pode ajudar a aumentar a resiliência do material a este tipo de fenómeno. Contudo, é importante chamar a atenção para o facto de a coesão superficial estar, geralmente, mais associada ao desgaste do que à ação de sais microscópicos.

3.7 Síntese

Em suma, um produto de acabamento à base de cal aérea, quando aplicado no caso particular de um edifício com características que o permitem classificar como antigo, ou como suscetível de receber uma intervenção de reabilitação, deve ser funcional e tanto quanto possível:

- semelhante às camadas existentes quanto à permeabilidade ao vapor de água;
- o menos permeável à água em estado líquido;

- ter menor propensão para fendilhar;
- o mais resistente à erosão e ao desgaste;
- o mais resistente ao arrancamento;
- o mais coeso superficialmente.

Estas características serão diferentes, consoante o tipo de utilização do edifício, a sua localização, ou até consoante o sítio onde cada produto de acabamento é aplicado, uma vez que existem diferenças significativas de funcionalidade quando um destes produtos é aplicado pelo exterior ou pelo interior. Contudo, esse tipo de análise deverá ser feita noutro contexto, sendo que neste estudo apenas se pretende observar as alterações induzidas pela adição de OG.

4 CAMPANHA EXPERIMENTAL

4.1 Materiais Utilizados

No decorrer da campanha experimental utilizaram-se três tipos principais de materiais, começando pela cal aérea em pasta que deu origem aos produtos de acabamento, o gesso cartonado que serviu de suporte para a aplicação desses produtos e, por fim, o OG com o qual se aditivaram as caiações e estanhados. A cal aérea em pasta é fornecida pela Fradical e é classificada como uma CL90. No caso do gesso cartonado, apesar de não se saber qual o seu tipo, uma vez que não foi adquirido de propósito para este estudo, tendo em conta que o cartão que ladeia a alma de gesso de ambos os lados é de cor verde, pode-se pressupor que se trata de um tipo de gesso cartonado vulgarmente utilizado em locais de elevada humidade, nomeadamente, instalações sanitárias e locais de cocção de alimentos. No que ao OG diz respeito, este foi produzido no Departamento de Ciências dos Materiais da FCT-UNL, pela equipa da Professora Isabel Ferreira.

4.2 Faseamento da Campanha Experimental

4.2.1 Preparação de Produtos de Acabamento

Prepararam-se dois tipos de produtos de acabamento, sendo eles caiações e estanhados. No caso das caiações, misturaram-se partes iguais, em volume, de cal aérea em pasta e água, obtendo-se assim um leite de cal que foi aplicado com trinchã. Já no caso dos estanhados, a sua preparação pressupõe apenas uma determinada dosagem de cal aérea em pasta que posteriormente foi aplicada no suporte diretamente, com recurso a uma talocha. Em qualquer dos dois casos, elaboraram-se três composições de cada produto de acabamento: a primeira composição que apenas serve de referência, não possui qualquer tipo de aditivo; a segunda composição foi aditivada com uma percentagem de 0,25% de OG; por fim, a terceira composição foi aditivada de 0,5% de OG. É de referir que estas percentagens são calculadas com base na massa de cal aérea do produto, o que significa que no caso das caiações, por exemplo, o cálculo da percentagem exclui a massa de água que foi adicionada aquando da preparação do leite de cal. Para além disso, considera-se importante referir que as percentagens de OG utilizadas são o resultado de pesquisa bibliográfica (embora com produtos à base de cimento) e de um estudo preliminar, que sugeriram que estes seriam teores aceitáveis de OG para o início deste estudo. A dispersão do OG no leite de cal e no estanhado foi feita através da mistura de cada um com pincel, no recipiente onde os produtos foram preparados. Esse processo foi efectuado até se obter uma mistura homogénea.

4.2.2 Aplicação de Produtos de Acabamento, Condições de Cura e Corte dos Provetes

Após a preparação dos produtos de acabamento, estes foram aplicados em três placas de gesso cartonado com dimensões semelhantes de 60cm x 54cm e espessura de aproximadamente 1,3cm. É possível observar uma dessas placas na figura 4.1. Para garantir homogeneidade na aplicação dos acabamentos, aplicaram-se os produtos com pinceladas sempre na mesma direção e em todas as placas foram aplicados o mesmo número de demãos, até se atingir uma espessura de acabamento de aproximadamente 1,5mm. Em termos práticos, traçou-se uma linha ao meio de cada placa e de cada lado aplicou-se um dos produtos de acabamento. Por motivos relacionados com a otimização do OG, aplicaram-se seis demãos de caiação em cada uma das três placas de gesso cartonado, sobrando material suficiente para uma demão de estanhado em cada placa. Devido às massas de cal empregues na elaboração dos produtos de acabamento e ao OG disponível, duas demãos de estanhado seriam algo impossível de realizar, uma vez que a quantidade de OG disponível não permitia aditivar uma quantidade tão grande desse tipo de produto. No entanto considerou-se que a camada de estanhado aplicada corresponderia a uma possibilidade de aplicação real. Por fim, considera-se importante referir nesta fase que as placas de gesso cartonado se encontravam ligeiramente empenadas, o que poderá ter promovido uma ligeira disparidade na espessura de acabamento em alguns pontos.



Figura 4.1 - Placa de gesso cartonado com produtos de acabamento aplicados

Passada a fase de aplicação das caiações e estanhados, as placas de gesso cartonado foram colocadas durante 28 dias num ambiente controlado, com $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $65\pm 5\%$ de humidade relativa. Face às reduzidas espessuras de aplicação, considerou-se que o fim dos 28 dias marcou a fase em que os provetes estavam prontos para serem manuseados, estando a cal

suficientemente carbonatada. Ao fim desse período de tempo cortaram-se os provetes, deixando-se os ensaios relacionados com a campanha experimental para mais tarde. Ainda neste capítulo, é de referir que os provetes mantiveram sempre a sua brancura, não se registando alterações nesse aspecto.

Para a execução dos vários ensaios previstos foi necessário cortar vários tipos de provetes das placas de gesso cartonado. Mais concretamente, eram necessários provetes cilíndricos com 90mm de diâmetro, provetes retangulares com 200mm x 40mm e uma série de placas para a realização de diversos ensaios, cada uma com 200mm x 250mm. Os provetes cilíndricos foram cortados das placas com recurso à máquina caroteadora que se pode ver na figura 4.2; os restantes foram cortados com x-ato.

Tendo em conta a natureza dos ensaios a efetuar, bem como a necessidade de identificar a natureza e constituição dos produtos de acabamento, tornou-se indispensável identificar cada um dos provetes acabados de cortar. Assim adotou-se uma simples nomenclatura para identificar o tipo de produto de acabamento, seguida de um ou dois algarismos que identificam a percentagem de OG. No quadro 4.1 pode-se consultar esse esquema de organização dos tipos de provetes.

Quadro 4.1 – Nomenclatura para identificação dos provetes

	0% OG	0,25% OG	0,50% OG
Pintura	P1_0	P1_0.25	P1_0.5
Estanhado	P2_0	P2_0.25	P2_0.5



Figura 4.2 – Processo de corte dos provetes

4.3 Ensaios Realizados

Neste estudo realizaram-se ensaios de fissuração, resistência ao desgaste, arrancamento e flexão, assim como ensaios de coesão e dureza superficial, permeabilidade ao vapor de água, absorção de água a baixa pressão, FT-IR, XRD e ângulo de contacto. Apresenta-se nesta secção uma síntese dos procedimentos de ensaio utilizados.

4.3.1 Suscetibilidade à Fissuração

Este ensaio é efetuado com recurso a uma lupa binocular de referência CS-100, tal como a que se pode ver na figura 4.3, equipamento esse que pode ser utilizado, por exemplo, para avaliar a abertura de fendas em peças estruturais de betão armado. Esse tipo de avaliação é feita encostando a lupa à superfície, procurando uma fenda e, seguidamente, medindo a abertura dessa fenda com a escala milimétrica que a lupa apresenta. No caso deste estudo registaram-se os valores de abertura de 24 fendas em cada placa de gesso cartonado, sendo 12 do lado da caiação e 12 do lado do estanhado, fazendo posteriormente a média e o desvio-padrão dos resultados obtidos para cada produto analisado.



Figura 4.3 – Lupa binocular e ensaio de fissuração

4.3.2 Resistência ao Desgaste

Para este ensaio utilizou-se o equipamento demonstrado na figura 4.4, produzido nos Laboratórios de Construção do DEC, semelhante a uma máquina caroteadora. Nesse aparelho, o provete pode ser pousado numa superfície, por baixo de uma escova que exerce uma força constante de 2kg na superfície do provete. O ensaio processa-se de tal forma que o ato de puxar uma corda faz

com que a escova dê 12 voltas, o que transforma essa rotação imposta numa solicitação de desgaste na superfície do provete. Posteriormente os resultados são obtidos através da diferença de peso do provete antes e depois da ação da escova, o que faz com que os valores obtidos sejam, naturalmente, a massa de material arrancado/desgastado em cada provete. Para o tratamento de resultados fazem-se a média e o desvio padrão correspondentes a cada composição analisada.



Figura 4.4 – Ensaio de erosão/desgaste

4.3.3 Resistência ao Arrancamento

Neste ensaio utilizam-se pastilhas metálicas que são coladas ao provete com cola epóxi, posteriormente um equipamento de arrancamento é fixo no provete e puxa a pastilha metálica, medindo a força necessária para se dar esse arrancamento. Neste caso a força necessária para arrancar a pastilha metálica era tão baixa que o aparelho vulgarmente utilizado neste ensaio não tinha sensibilidade suficiente para registar a força exercida. Assim, optou-se por criar uma peça que permitiu efetuar o ensaio num aparelho que, à partida, não é tão utilizado para este propósito. Não foi realizado qualquer corte prévio nas amostras de aderência. Foi assim então que se adaptou o equipamento de tração Zwick GmbH & Co, de tipo 1486, com número de série 126124 e número de fabricante 70468, onde se fixaram os provetes e se arrancaram as pastilhas, registando os valores de arrancamento através do software do equipamento. Este processo pode ser observado na figura 4.5. Arrancaram-se 3 pastilhas em cada metade de placa de gesso cartonado para cada percentagem de OG e tipo de produto de acabamento. Esses valores são então tratados de forma estatística, sendo interpretados através de média e desvio-padrão.



Figura 4.5 – Ensaio de arrancamento

4.3.4 Resistência à Flexão

Para a avaliação da resistência à flexão construiu-se uma base em madeira, onde se aparafusaram pedaços de madeira previamente cortados com determinadas curvaturas. A madeira foi cortada de forma que se lhe aparafusasse os provetes, estes tomassem uma configuração deformada que acompanhasse a curvatura desses bocados de madeira. As curvaturas que se escolheram foram, da menos acentuada para a mais pronunciada, com raios de 500, 250 e 100 mm e foram previamente desenhadas em AutoCad, sendo posteriormente impressas numa escala de 1:1 e coladas em pedaços de madeira que foram cortados conforme o desenho. Este equipamento de ensaio, bem como o esquema de AutoCad, encontram-se expostos na figura 4.6.

Os provetes utilizados neste ensaio foram os mais longos, com dimensões 20cm x 4cm x 2cm. Esses provetes foram perfurados de ambos os lados com berbequim, sendo que de seguida foram aparafusados aos pedaços de madeira, tendo-se feito uso de anilhas nos parafusos, para distribuir as tensões inerentes ao processo de aparafusagem. Este detalhe é importante, uma vez que gesso cartonado pode ser bastante quebradiço no que toca a ações pontuais. Após o processo de aparafusagem dos provetes, observaram-se as fendas existentes na sua superfície, recorrendo para isso uma vez mais à lupa binocular, sendo de notar que para cada provete se mediram três fendas distintas.

No que diz respeito à população de resultados, esta é composta por 18 provetes, sendo que estes estão igualmente repartidos em número por ambos os produtos de acabamento e pelas várias percentagens de OG em estudo. Nesse sentido, a título de exemplo, dispunham-se de três provetes de estanhado com 0,25% de OG e assim, aparafusou-se cada um desses provetes a uma curvatura, tendo-se posteriormente registado três aberturas de fenda em cada provete. Este processo é análogo para os outros grupos de provetes.

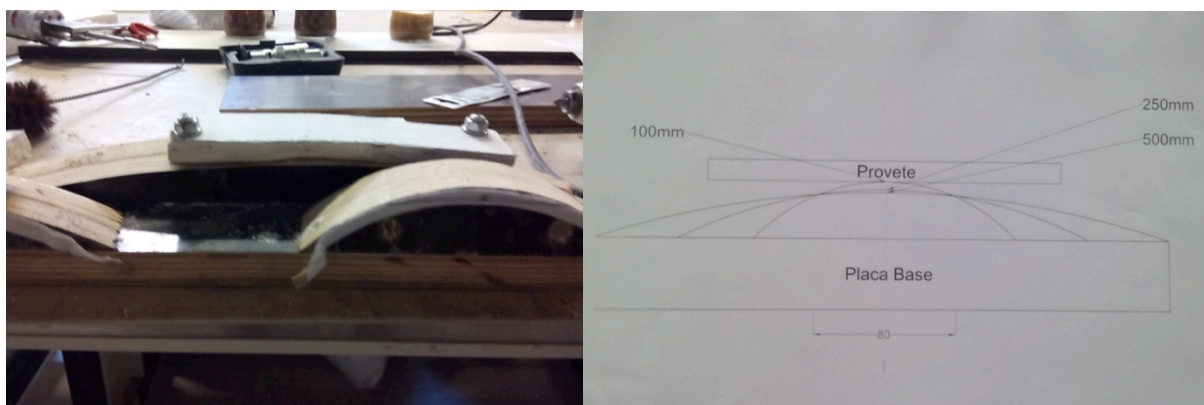


Figura 4.6 – Ensaio de flexão e esquema AutoCad

4.3.5 Coesão Superficial

Para aferir a coesão superficial começa-se por cortar vários pedaços de fita cola, todos eles com as mesmas dimensões, e de seguida colam-se à superfície dos provetes. Em cima da fita cola colocam-se quadrados de borracha previamente cortados, todos eles com as mesmas dimensões, por forma a distribuir uniformemente as tensões que serão geradas posteriormente, pela aplicação de 5kg de peso em cima da área abrangida pela fita cola. Esse peso é aplicado durante um intervalo de tempo constante e igual para todos os provetes, de forma a garantir a uniformidade das condições de ensaio e, como consequência, comparabilidade de resultados. Para finalizar, a fita é arrancada com um único movimento rápido. Este processo pode ser observado na figura 4.7. O tempo de aplicação do peso foi estipulado em cinco minutos e o valor da coesão superficial é dado pela diferença de massa da fita cola antes e após o arrancamento, ou seja, a quantidade de material arrancado aquando da remoção da fita cola. Os resultados foram tratados de forma semelhante à exposta no caso da resistência ao arrancamento.



Figura 4.7 – Ensaio de coesão superficial

4.3.6 Dureza Superficial

O ensaio de dureza superficial é efetuado com recurso ao durómetro Shore A HD 3000 ilustrado na figura 4.8, equipamento esse que está de acordo com as normas DIN 53505, ISO 868 e 7619 e ASTM D 2240. Este aparelho possui uma agulha móvel na extremidade, agulha essa que regista a dureza superficial do material. Existem diversas escalas para este aparelho; a escala A pode variar entre os 0 e os 100 graus Shore A, significando que quanto maior o valor obtido nessa escala, maior será a dureza superficial. Efetuaram-se 15 medições em cada metade de placa de gesso cartonado, o que resulta em 90 valores distribuídos igualmente pelos dois tipos de produtos de acabamento e pelas três dosagens de OG.



Figura 4.8 – Ensaio de dureza superficial

4.3.7 Permeabilidade ao Vapor de Água

Na realização deste ensaio seguiram-se as indicações da norma EN15803 (CEN, 2009). Utilizaram-se os provetes cilíndricos de 90 mm onde anteriormente haviam sido aplicados os produtos de acabamento e começou-se por medir a espessura desses mesmos provetes com uma craveira, sendo que essa medição é vital para o posterior tratamento dos resultados do ensaio. É de referir que os provetes, sendo cortados de uma placa de gesso cartonado podem não ter uma espessura perfeitamente constante, por esse motivo, efetuou-se uma série de quatro medições com a craveira em cada provete e no fim fez-se uma média dessas medições para obter uma espessura média representativa de cada provete. De seguida limparam-se as cápsulas metálicas necessárias para a realização do ensaio, foram colocados pedaços de algodão no interior dessas cápsulas e saturaram-se esses pedaços de algodão com água. Os provetes cilíndricos foram então colocados no topo das cápsulas e selados com anéis metálicos e silicone para vedar as juntas, garantindo a estanquidade do conjunto, o que consequentemente dá a garantia que todo o fluxo de vapor de água se dará pela

superfície dos provetes, garantindo assim condições ótimas para se poder ensaiar os produtos de acabamento aplicados nos provetes.

Numa segunda fase os provetes foram colocados na câmara climática visível na figura 4.9, em condições controladas de $23\pm1^{\circ}\text{C}$ de temperatura e $50\pm3\%$ de humidade relativa. A forma como se avalia a permeabilidade ao vapor de água está relacionada com a perda de massa que se observa ao longo do tempo, sendo que essa perda de massa está diretamente relacionada com a quantidade de vapor de água que consegue dissipar-se pela superfície dos provetes. Assim, torna-se necessário efetuar pesagens consecutivas, de 24 em 24h, numa balança de precisão. Esse procedimento de pesagem sistemática é repetido tantas vezes quantas for necessário, até se obter uma estabilização da variação de massa entre pesagens. Essa estabilização pode ser encarada como pelo menos cinco pesagens sucessivas que num gráfico de variação de perda de massa versus tempo representem cinco pontos alinhados. Esses pontos, após a utilização de uma regressão linear, darão origem a um índice que representa a quantidade de vapor de água que permeou através do provete ao longo do tempo (G) que será necessário para obter os resultados finais relacionados com este ensaio.

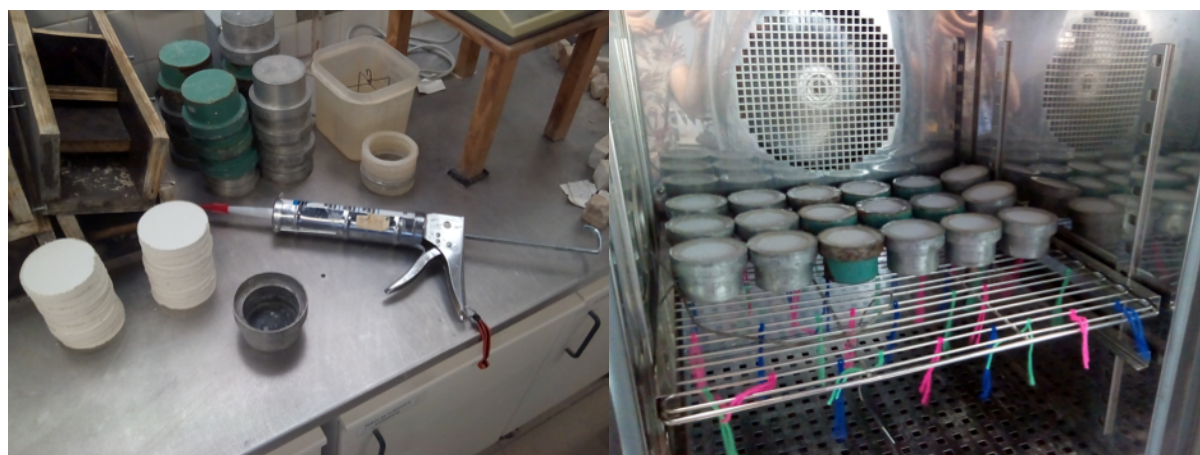


Figura 4.9 – Ensaio de permeabilidade ao vapor de água

Para a obtenção do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e da espessura da camada de ar de difusão equivalente calcula-se a permeância do vapor de água através da equação 4.1.

$$Wp = \frac{G}{A \cdot \Delta p} \quad \text{Equação 4.1}$$

em que: W_p representa a permeância do vapor de água em $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$; A é a área superficial de ensaio, medida com craveira em m^2 ; Δp é o diferencial de pressão parcial em MPa; G é o índice de transferência de vapor de água através do provete em kg/s .

Posteriormente, pôde-se calcular a permeabilidade ao vapor de água propriamente dita. Esta é nada mais do que o produto da permeância do vapor de água anteriormente calculada, pela

espessura do provete, medida com craveira. Assim, tendo todos os dados até agora descritos, recorre-se à equação 4.2.

$$\delta p = Wp * e_{\text{médio}} * 10^{12} \quad \text{Equação 4.2}$$

Em que:

δ_p - Permeabilidade ao vapor de água em [ng/(m.s.Pa)]

Wp - Permeância do vapor de água em [kg/(m².s.Pa)]

$e_{\text{médio}}$ - Espessura média do provete em [m]

Este valor de permeabilidade é calculado para todos os provetes utilizados no ensaio, uma vez que se dispõe de valores de pesagens de todos os provetes que foram colocados na câmara climática. No entanto, esses valores são depois tratados estatisticamente, através de média e desvio-padrão, de forma a poder-se, não só, analisar melhor os valores obtidos, como também a poderem procurar –se melhor tendências específicas de evolução dos valores, à medida que se aumenta o teor de OG na composição dos produtos de acabamento que estão aplicados nos provetes.

De seguida passa-se ao cálculo da espessura da camada de ar de difusão equivalente, grandeza que essa que pode ser obtida pela aplicação da equação 4.3 a seguir apresentada.

$$S_d = \frac{e_{\text{médio}} * \delta_a}{\delta_p} \quad \text{Equação 4.3}$$

Em que:

S_d - Espessura da camada de ar de difusão equivalente em [m]

$e_{\text{médio}}$ - Espessura média do provete em [m]

δ_a - Permeabilidade do ar ao vapor de água em [kg/(m.s.Pa)]

δ_p - Permeabilidade ao vapor de água em [ng/(m.s.Pa)]

4.3.8 Absorção de Água a Baixa Pressão

A preparação do ensaio é relativamente simples, sendo que se utilizou uma craveira para medir as áreas interiores de contato dos tubos de Karsten e posteriormente se vedaram os tubos com plasticina na superfície dos provetes, exercendo uma força suficiente que garantisse a correta estanquidade e que evitasse a ocorrência de fugas aquando do ensaio. De seguida encheram-se com água os tubos até ao limite 0 ml e iniciou-se o ensaio.

Para a realização deste ensaio, inicialmente pretendia-se utilizar a norma EN 16302 (CEN, 2013), norma essa que em termos de procedimento estipula que, após o início do ensaio, se deverá registar o nível dentro dos tubos de Karsten em intervalos de entre 10 segundos e 1 minuto,

efetuando posteriormente leituras de 5 em 5 minutos até um nível constante ser atingido. Contudo, notou-se que os produtos de acabamento aplicados nos provetes eram tão impermeáveis que a descida do nível dentro dos tubos se processava de uma forma muito mais lenta. Assim, optou-se por utilizar uma variante da norma, na qual se efetua o processo inverso, ou seja, apenas se regista o tempo que o nível de água demora até atingir os maiores traços da graduação dos tubos de Karsten.

Cada produto de acabamento foi testado com 9 tubos de Karsten, perfazendo um total de 18 tubos. Dos 9 tubos referentes a cada produto de acabamento, cada 3 testaram uma diferente percentagem de aditivo. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente e também através da forma aconselhada pela norma. É de notar que apesar do cuidado em garantir que a plasticina vedava bem a periferia dos tubos de Karsten, houve duas situações de fuga que acabaram por inutilizar os resultados a elas referentes.

Para finalizar, refere-se que o ensaio dura 60 minutos no máximo e se se atingir um nível constante nos tubos antes desse intervalo de tempo, o ensaio pode ser parado antecipadamente. Tendo em conta que os resultados deste ensaio também podem ser analisados em termos de nível de água nos tubos, ao fim de 60 minutos, caso se pare o ensaio antecipadamente, considera-se que o nível de água no tubo nesse instante é o nível que o tubo teria aos 60 minutos, uma vez que para que se pare o ensaio antecipadamente, é condição necessária que o nível de água já não vá sofrer mais alterações. A figura 4.10 permite visualizar o decorrer deste ensaio.



Figura 4.10 – Ensaio de absorção de água a baixa pressão

No tratamento de resultados referentes a este ensaio pretende-se obter o coeficiente de absorção de água e, de forma a facilitar a interpretação dos dados, apresentam-se tanto o coeficiente de absorção de água da média referente a cada produto de acabamento e a cada percentagem de OG, como também o coeficiente associado à média dos níveis nos tubos ao fim de uma hora de

ensaio. Nesse caso, cada uma das médias compreende também valores de nível referentes a uma percentagem de aditivo em cada produto de acabamento.

Contabilizou-se o tempo que o nível de água demorou até atingir cada traço de ml no tubo de Karsten graduado e esses intervalos de tempo foram inseridos numa tabela, em segundos e utilizou-se a equação 4.4 para calcular o coeficiente de absorção capilar associado a cada tubo de Karsten. Devido ao uso desta forma alternativa da norma, o coeficiente de absorção não aparecerá associado a intervalos de tempo, mas sim aos níveis principais da graduação dos tubos de Karsten.

$$C_{\text{absorção}} = \frac{\frac{m_{\text{abs}}}{1000}}{\frac{\pi \times d^2}{4} \times 10^{-6} \times \sqrt{t}} \quad \text{Equação 4.4}$$

Em que:

$C_{\text{absorção}}$ - Coeficiente de absorção de água em $[\text{Kg}/(\text{m}^2 \text{ min}^{-5})]$

m_{abs} - Massa de água absorvida [g]

d - Valor médio do diâmetro da maior abertura do tubo de Karsten [mm]

4.3.9 Espectrofotometria de Infra-Vermelho com Transformada de Fourier (FT-IR)

Este ensaio foi realizado no CENIMAT, com o apoio do Engenheiro Paulo Duarte. Trata-se de um tipo de procedimento que, através de espectroscopia, analisa amostras extremamente pequenas de pó, que foram previamente raspadas dos provetes. As medições de raios infravermelhos foram efetuadas à temperatura ambiente com um espectrofotómetro Thermo-Nicolet 6700 da Thermo Electron Corporation, operando a uma resolução de 4cm^{-1} , em modo de reflexão total atenuada (RTA). Esse aparelho pode ser observado na figura 4.11. Todas as medições foram obtidas no intervalo médio da radiação infravermelha ($500\text{-}5000\text{ cm}^{-1}$). O espectrofotómetro deteta os números de onda associados aos constituintes do pó e produz um espectro onde se podem observar vários picos, representando cada pico a existência de um determinado elemento na composição da amostra. Para isso raspou-se da superfície da amostra uma pequena quantidade de produto de acabamento, tornando-o um pó que foi guardado num *ependorf* e levado para o local de ensaio. Essencialmente, se já se sabe a composição química da amostra, o FT-IR vem apenas confirmar aquilo que já se sabe. No entanto, uma vez que o pó analisado provém apenas de uma pequena área do provete, se por exemplo, o FT-IR detetar OG na sua constituição, esse resultado é importante, uma vez que indica uma boa dispersão desse nanomaterial por toda a superfície que foi caiada ou estanhada. Em última análise, este tipo de ensaio pode confirmar a presença das diferentes percentagens de OG nos dois tipos de produtos analisados.

Para a realização do ensaio, raspou-se uma amostra representativa de cada produto de acabamento e de cada percentagem de aditivo, ficando-se com seis amostras no total.



Figura 4.11 – Ensaio de FT-IR

4.3.10 Difração de raios X (XRD)

Este ensaio foi realizado no CENIMAT com o apoio do Engenheiro Paulo Duarte e com a sua realização pretendem-se determinar as fases mineralógicas contidas nas amostras de cal aérea, tanto nos provetes de controlo, como nos provetes aditivados com OG. O equipamento utilizado para este ensaio foi um defractómetro raio-x PANalytical X'Pert PRO MRD, com uma fonte de radiação monocromática $\text{CuK}\alpha$ (comprimento de onda de 1.540 598 Å). As medições de XRD foram efetuadas entre 10 e 90 graus (2θ), com um passo de 0.001 graus. Para a sua realização, reduzem-se a pó amostras retiradas dos provetes, sendo que posteriormente essas amostras são analisadas no equipamento de XRD. O que se obtém com o ensaio são uma série de espectros que revelam informação acerca da estrutura cristalina dos vários provetes. Mais concretamente, essa informação é observada sob a forma de picos nos espectros, sendo que cada pico representa um componente da estrutura do material. A população de amostras foi constituída por seis elementos, divididos pelas várias percentagens de aditivo e sendo três de cada tipo de produto de acabamento.

4.3.11 Ângulo de Contato

O ensaio do ângulo de contato foi efetuado no departamento de química da FCT-UNL com o auxílio do Professor João Sotomayor. O ensaio processa-se de forma que, ao se deixar cair uma gota de água na superfície de um material, uma câmara possa filmar esse acontecimento e enviar informação relevante para um determinado software, que se encarrega de medir o ângulo de contato entre a gota e a superfície que com ela contacta. Pode-se observar este processo na figura 4.12. Este método pressupõe que tem de existir um intervalo de tempo mínimo no qual a gota se encontra

perfeitamente formada em cima do material, permitindo assim que a câmara filme e comunique atempadamente com o software, para que este possa efetuar todos os cálculos. Em superfícies hidrofóbicas isto não costuma ser um problema, uma vez que nesse caso uma gota pode manter a sua forma durante largos intervalos de tempo. No entanto, no caso de uma superfície hidrófila, tal como é o caso dos produtos de acabamento abrangidos neste estudo, a gota foi imediatamente absorvida pelo material, impossibilitando a extração de resultados relevantes do ensaio. Assim, realizou-se o ensaio mas não se puderam obter valores concretos em relação ao ângulo de contato.



Figura 4.12 – Ensaio de ângulo de contacto

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo apresentam-se figuras com os resultados dos ensaios anteriormente descritos. No fim do capítulo estarão disponíveis quadros para uma consulta mais detalhada e nos anexos estarão valores individuais dos ensaios. É importante referir que, sendo que todos os provetes são semelhantes em termos do produto de acabamento que neles foi aplicado, o único diferenciador é a percentagem de OG que é utilizada para os aditivar. Assim, quaisquer variações de resultados podem, em princípio, ser diretamente correlacionadas com o aditivo. Para além disso, se se tiver em conta que todos os provetes são sujeitos a condições de ensaio exatamente semelhantes, bem como ao facto de se terem aplicado os produtos de acabamento de forma contínua, antes do corte dos provetes, então pode-se ter ainda mais segurança da influência do aditivo nos resultados que se seguem.

Por outro lado, importa referir também que em todos os ensaios a distribuição de amostras foi feita da mesma forma, variando apenas o número de provetes em cada uma, querendo isto dizer que em todos os casos se ensaiou um determinado número de amostras referentes a cada produto de acabamento, sendo que esse número de amostras ensaiadas geralmente estará repartido em partes iguais que englobam diferentes percentagens de OG.

Outra consideração a ter em conta é a forma como o tratamento estatístico dos dados é feito. Nesse sentido, sabendo que a distribuição das amostras ensaiadas está repartida por produto de acabamento e por percentagem de aditivo, em todos os casos, os dados serão tratados em dois grandes grupos, sendo eles pintura ou estanhado e, posteriormente, são subdivididos em três subgrupos, cada um correspondente a uma percentagem diferente de OG.

5.2 Avaliação da Fissuração

Tal como anteriormente referido, a avaliação da fissuração é apenas qualitativa e baseada apenas numa observação visual com lupa. Ao executar este ensaio, ficou claro que o estanhado era o único produto de acabamento que tinha fendilhado, uma vez que a pintura não apresentou qualquer tipo de fendilhação observável. Este fenómeno poderá dever-se ao facto de a pintura ter sido aplicada em seis demãos, ao passo que o estanhado, por limitações relacionadas com a quantidade de material, apenas foi aplicado uma vez. Um maior número de demãos poderia minimizar a fissuração observável no estanhado, aproximando os seus valores dos observados na pintura. Há também que referir que o OG não parece ter influenciado a ocorrência de fendilhação no estanhado, uma vez que para os vários teores de óxido não há variações significativas relacionadas com a presença do aditivo. No quadro 5.1 apresentam-se os valores obtidos no ensaio de avaliação da fissuração, mais

concretamente os valores médios e os desvios-padrão referentes a cada percentagem de aditivo englobada em cada tipo de produto de acabamento.

Quadro 5.1 – Resultados do ensaio de fissuração

	% OG	Média [mm]	Desv. Pad. [mm]
Caição	P1_0	0	0
	P1_0.25	0	0
	P1_0.5	0	0
Estanhado	P2_0	0,045	0,006
	P2_0.25	0,048	0,007
	P2_0.5	0,045	0,008

5.3 Resistência ao Desgaste

A principal conclusão que se pôde retirar deste ensaio foi que o OG em nada contribuiu para a alteração da resistência a este tipo particular de solicitação. Não se pôde observar uma evolução dos resultados numa direção bem definida, sendo de notar que esta não seguiu nenhum padrão específico à medida que a percentagem de aditivo aumenta. Mais concretamente, no caso da pintura os resultados permaneceram praticamente constantes com o aumento de OG. No caso do estanhado, a percentagem de 0,5% parece ser melhor que 0,25% e ligeiramente melhor que a referência. Apresenta-se de seguida a figura 5.1 onde os dados deste ensaio são apresentados e o seu tratamento estatístico pode ser analisado.

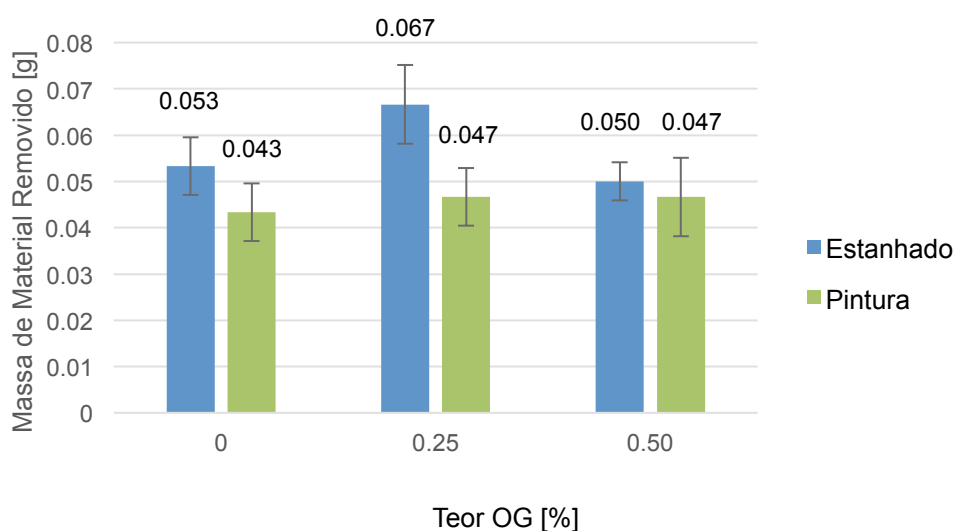


Figura 5.1 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de resistência ao desgaste na pintura e no estanhado

5.4 Resistência ao Arrancamento

Os resultados relativos a este ensaio denotam influência positiva do OG. Parece ter havido um aumento de resistência ao arrancamento, tanto no caso da pintura, como no caso do estanhado. É de referir que o modo de rotura observado foi sempre do tipo adesivo e que a população de amostras ensaiadas foi relativamente reduzida, pelo que o ideal teria sido ensaiar um maior número de amostras de forma a conferir uma expressão maior aos resultados. Por limitações relacionadas com o número de pastilhas metálicas disponíveis, isso não foi possível. Note-se que estatisticamente, aquando do tratamento dos resultados, sempre que a população de amostras referentes a uma determinada percentagem de aditivo e a um determinado tipo de produto de acabamento não compreende pelo menos três valores, o desvio-padrão já não é utilizado para a interpretação dos resultados. Esta situação ocorreu neste caso, uma vez que não só a população de amostras a ensaiar já era bastante reduzida, como também o ensaio de algumas dessas amostras não correu como seria esperado, o que reduziu ainda mais o número de valores disponíveis para o tratamento estatístico dos dados.

Os resultados positivos obtidos neste ensaio são importantes, uma vez que ajudam a reforçar indícios de influência positiva do OG noutros casos que foram estudados nesta dissertação, casos esses que serão abordados mais à frente. De seguida apresenta-se a figura 5.2 onde se podem ler os dados obtidos e onde se poderá proceder à interpretação dos resultados.

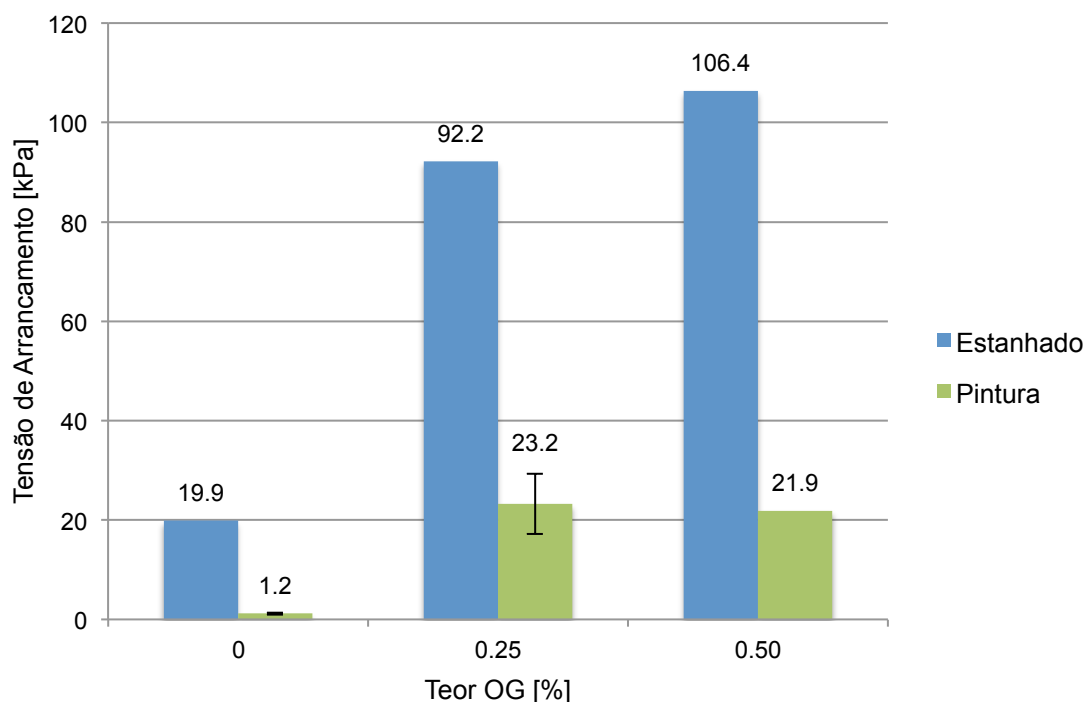


Figura 5.2 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de arrancamento na pintura e no estanhado

5.5 Resistência à Flexão

Em primeiro lugar, neste ensaio ocorreu um problema relacionado com o raio de 100 mm, raio esse que corresponde à curvatura mais acentuada que se tentou impor aos provetes. Aquando da aparafusagem, constatou-se que os provetes de gesso cartonado partiam a meio, sendo que se tornou impossível avaliar o comportamento dos produtos de acabamento para esta curvatura. Assim, daqui em diante deixarão de se referir resultados referentes a esta curvatura. Outro pormenor que se pensa ser importante foi o facto de, no caso da pintura, tal como era esperado, terem havido valores inferiores referentes à média da abertura de fendas, quando comparados com os valores obtidos no caso do estanhado. Para além disso, uma observação que se fez aquando da tentativa de aparafusagem dos provetes no raio de 100mm, foi o facto de a superfície da tinta estalar mais tarde e de uma forma aparentemente plástica, parecendo que esta esticava um pouco antes de ceder, ao passo que o estanhado se desfazia superficialmente de forma quase imediata. No entanto esta observação só é válida para o caso em que se tentou impor uma curvatura extrema nos provetes. De seguida irão expor-se os resultados referentes às duas curvaturas menos acentuadas, 500mm e 250mm.

Os resultados apresentados na figura 5.3 demonstram influência do OG. Uma vez mais, são observáveis melhorias, especialmente no caso do estanhado, consistentes com o aumento do teor de OG. Já no caso da pintura, não ficou claro se o OG terá tido uma influência tão positiva, uma vez que, aparentemente, houve uma pioria para o raio de 500 mm e apenas melhorias ligeiras para o raio de 250 mm. Esses dados são o contrário do que seria de esperar, uma vez que seria mais intuitivo que houvesse uma ligeira pioria nos valores associados ao raio mais acentuado e uma ligeira melhoria nos valores do raio que impõe uma curvatura mais suave. Esta situação inversa pode denotar uma má execução do processo de aparafusagem dos provetes. A falta de resultados melhores para a pintura poderá estar relacionada com o facto de, tal como já se viu no ensaio de fissuração, a pintura ter menos tendência para a fendilhação e assim, talvez seja preciso executar o ensaio com raios mais acentuados. No entanto, para tal seria necessário escolher outro tipo de suporte, uma vez que o gesso cartonado partirá quando sujeito a curvaturas de 100mm. De qualquer modo considera-se que os raios de 500 mm e de 250 mm já correspondem a situações reais agressivas em termos de deformação.

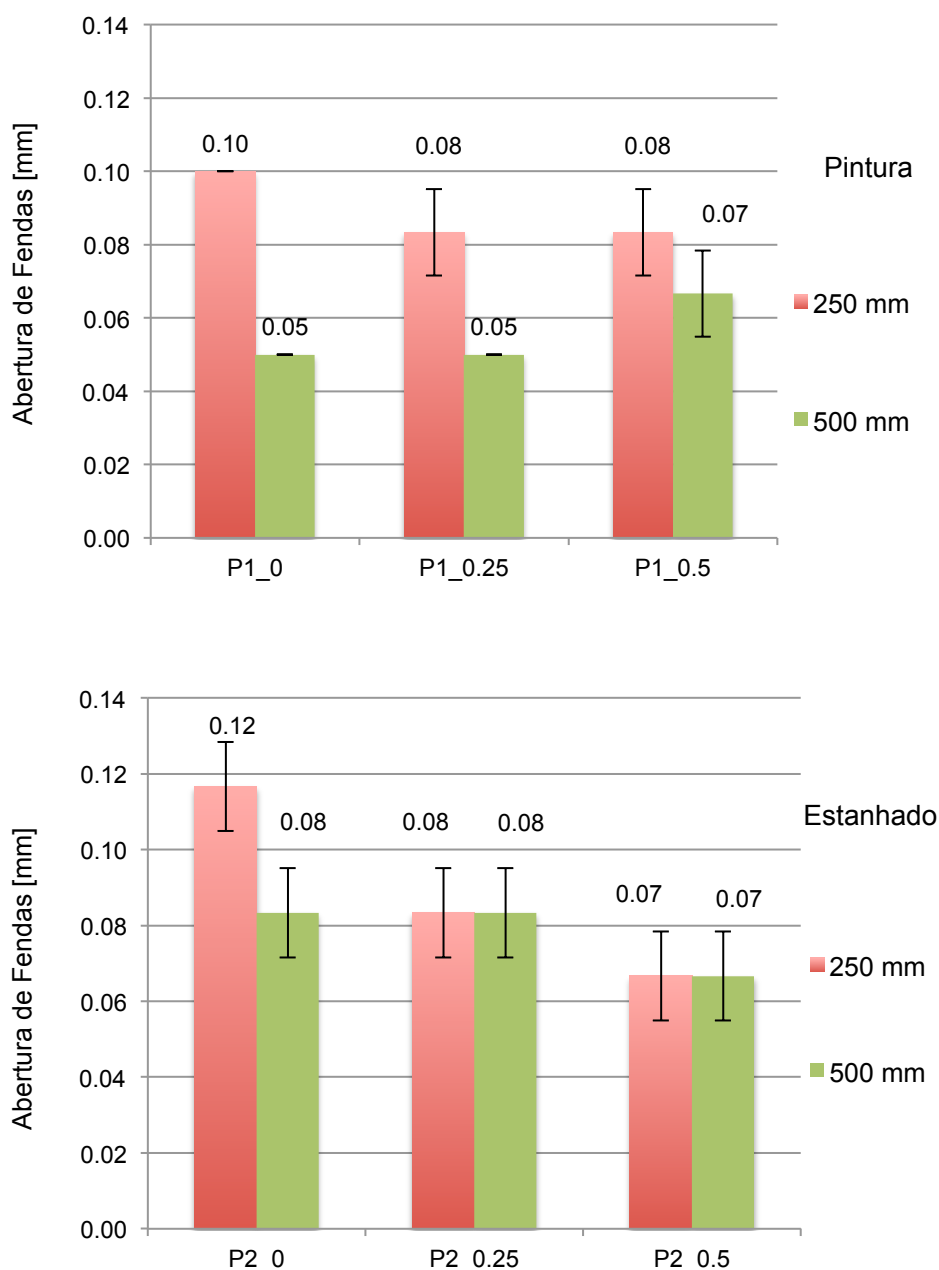


Figura 5.3 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de flexão na pintura e no estanhado

5.6 Coesão Superficial

De uma forma geral, os resultados obtidos neste ensaio são facilmente interpretáveis e apontam para uma ligeira melhoria da coesão superficial influenciada pela adição do OG. É de notar também que essa melhoria, tal como aconteceu no caso da resistência ao arrancamento, segue uma tendência de aumento simultâneo com o aumento do aditivo. Note-se que os resultados deste ensaio se medem em massa de material arrancado, o que significa que o aumento de coesão superficial que se relata neste capítulo está associado a um decréscimo dessa massa de material arrancado.

Apresentam-se de seguida a figura 5.4, onde se podem ver graficamente os resultados obtidos neste ensaio.

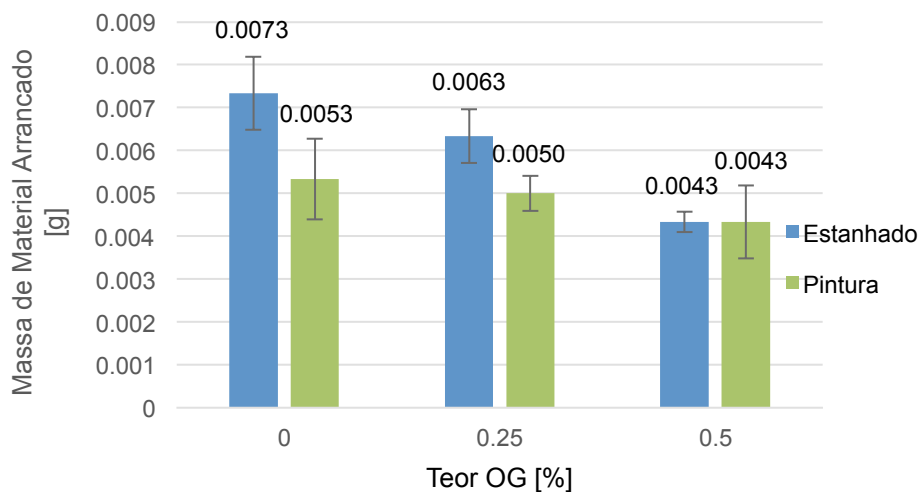


Figura 5.4 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de coesão superficial na pintura e no estanhado

5.7 Dureza Superficial

Uma vez mais o OG parece ter aumentado as características mecânicas superficiais, desta vez tratando-se da dureza superficial. No entanto, ao passo que a pintura seguiu a tendência de aumento de resistência observada noutros ensaios, o estanhado forneceu valores inconclusivos que poderão estar relacionados com uma falta de homogeneidade dos pontos ensaiados no que toca à presença de aditivo. Os resultados inconclusivos no caso do estanhado poderão estar relacionados também com o facto de os valores se encontrarem acima do limite de sensibilidade do durómetro. De seguida encontra-se a figura 5.5 onde se podem consultar os resultados obtidos.

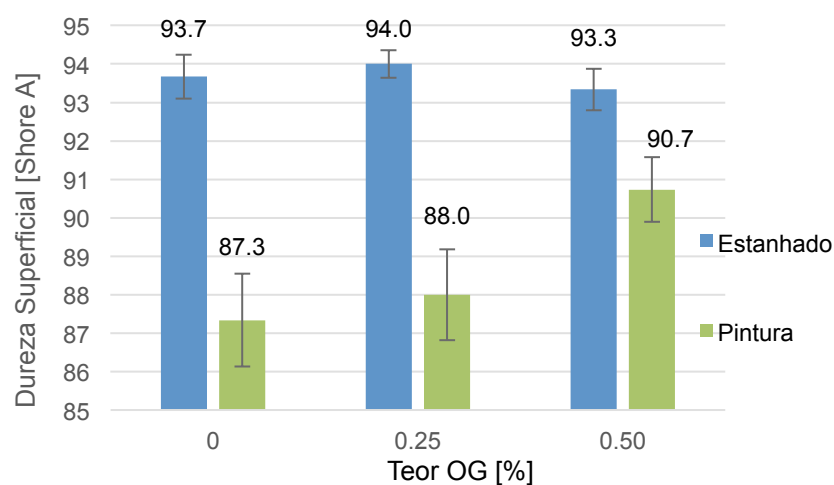


Figura 5.5 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de dureza superficial na pintura e no estanhado

5.8 Permeabilidade ao Vapor de Água

Pela forma como os resultados são tratados, de todos os provetes envolvidos neste ensaio, no fim obtêm-se quatro gráficos principais. Dois são referentes à permeabilidade ao vapor de água, sendo que desses dois, um é referente à pintura de cal, com cada barra referente a uma percentagem de adição de OG, e o outro refere-se ao estanhado e a informação é apresentada da mesma forma. Os restantes dois gráficos representam a espessura da camada de ar de difusão equivalente (apenas outra forma de apresentar os resultados da permeabilidade ao vapor) e representam os mesmos grupos de provetes ensaiados. Na figura 5.6 apresentam-se os dados finais que foram obtidos com a realização deste ensaio e chama-se a atenção para o facto de P1 indicar valores relacionados com a pintura por caiação e P2 com o estanhado.

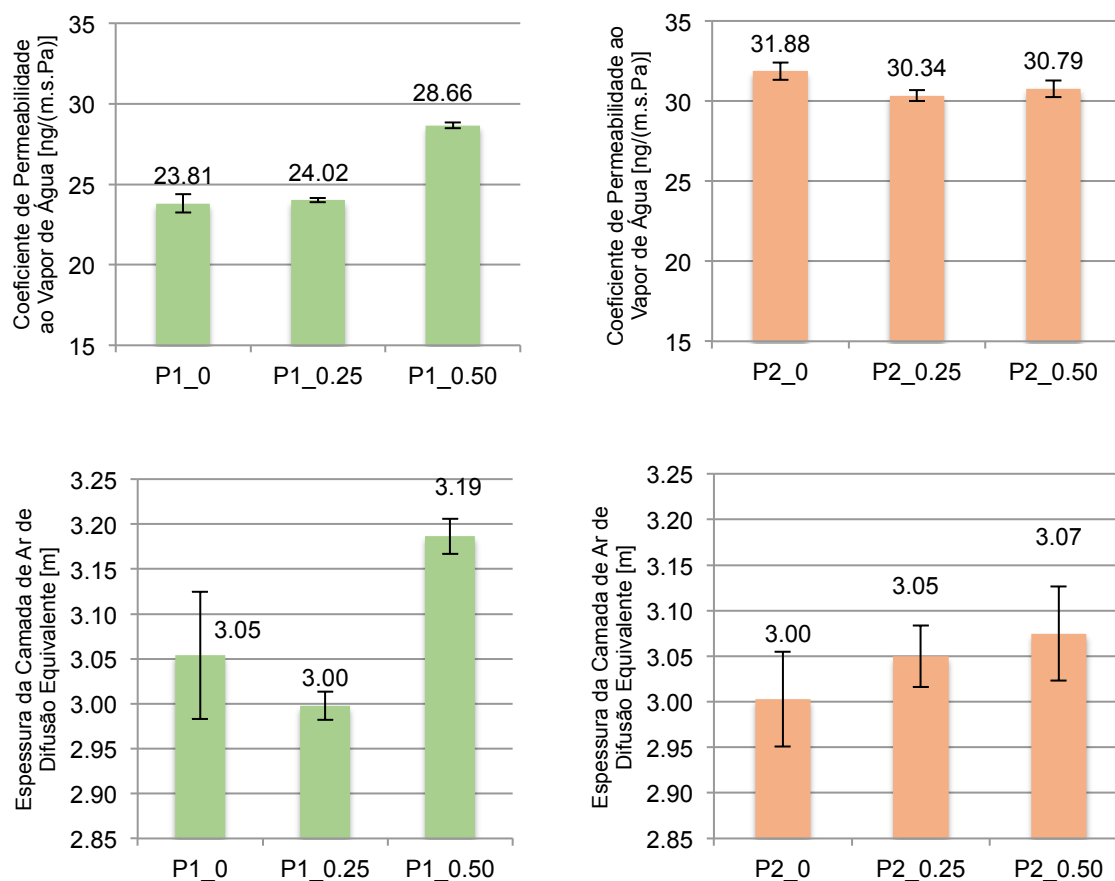


Figura 5.6 – Valores médios do ensaio de permeabilidade ao vapor de água e de espessura da camada de ar de difusão equivalente

Dos resultados obtidos, colocando de parte a influência do OG, pode-se observar que, de uma forma geral, o estanhado apresenta características de permeabilidade ao vapor de água

superiores às apresentadas pela pintura de cal. Nomeadamente o coeficiente de permeabilidade ao vapor de água é superior no caso do estanhado e inferior para a pintura de cal. Para além disso, no caso do estanhado a espessura da camada de ar de difusão equivalente é inferior, em média, à espessura para a pintura de cal. Tendo isto em conta, sendo o estanhado mais permeável ao vapor de água do que a pintura de cal, faz sentido que tenha uma espessura de camada de ar de difusão equivalente inferior, uma vez que maior permeabilidade corresponderá a uma camada de ar mais fina e vice-versa.

Passando à influência do OG, esta faz-se sentir na permeabilidade no caso da pintura de cal e, pelos motivos anteriormente descritos, é normal que essa influência seja extensível ao caso da espessura da camada de ar de difusão equivalente, uma vez que esta grandeza resulta diretamente da permeabilidade ao vapor de água. No caso da pintura, há um aumento consistente do coeficiente de permeabilidade ao vapor de água e a tendência desse aumento acompanha o acréscimo do teor de OG presente nas amostras. No caso do estanhado, este já é tão permeável ao vapor de água que a adição do OG não induz alterações neste comportamento. Esta afirmação é baseada no facto de a introdução de teores de aditivo cada vez maiores não alterar os resultados da permeabilidade de forma significativa. Pode-se então observar que neste caso o OG não atua como um inibidor da permeabilidade ao vapor de água num material que por si só já é extremamente permeável.

Outro pormenor que se gostaria de referir, possível causador desta discrepância nos resultados, é o facto de só se ter dado uma demão de estanhado nos provetes, o que foi o possível causador da fendilhação que foi observada no ensaio de fissuração. Essa fendilhação não esteve presente nos provetes pintados, sendo que nesses a tendência para a fendilhação foi até nula. Esta diferença entre a integridade da superfície de ambos os tipos de produtos de acabamento pode estar na origem dos bons resultados obtidos para a pintura, acabamento esse que ficou perfeitamente livre de fendilhação, e dos resultados inconclusivos para o caso do estanhado, que por sua vez apresentou a fendilhação acima referida. Esse fenómeno cria faixas de descontinuidade por onde o vapor de água se pode escapar com maior facilidade, o que pode levar a valores de permeabilidade ao vapor de água superiores, tal como aconteceu, mas que no entanto falseia a suposta influência do OG, uma vez que assim o principal factor que condiciona a maior ou menor permeabilidade dos provetes passam a ser essas zonas de descontinuidade causadas pela fendilhação e não a inclusão do OG. Esta explicação também será válida para um fenómeno observado no ensaio de absorção de água a baixa pressão, a seguir apresentado em termos de resultados.

5.9 Absorção de Água a Baixa Pressão

Na figura 5.7 apresentam-se os coeficientes de absorção referentes às médias de dezoito tubos de Karsten. Esses coeficientes dizem respeito aos níveis de 1ml na figura de cima e 2ml na figura de baixo.

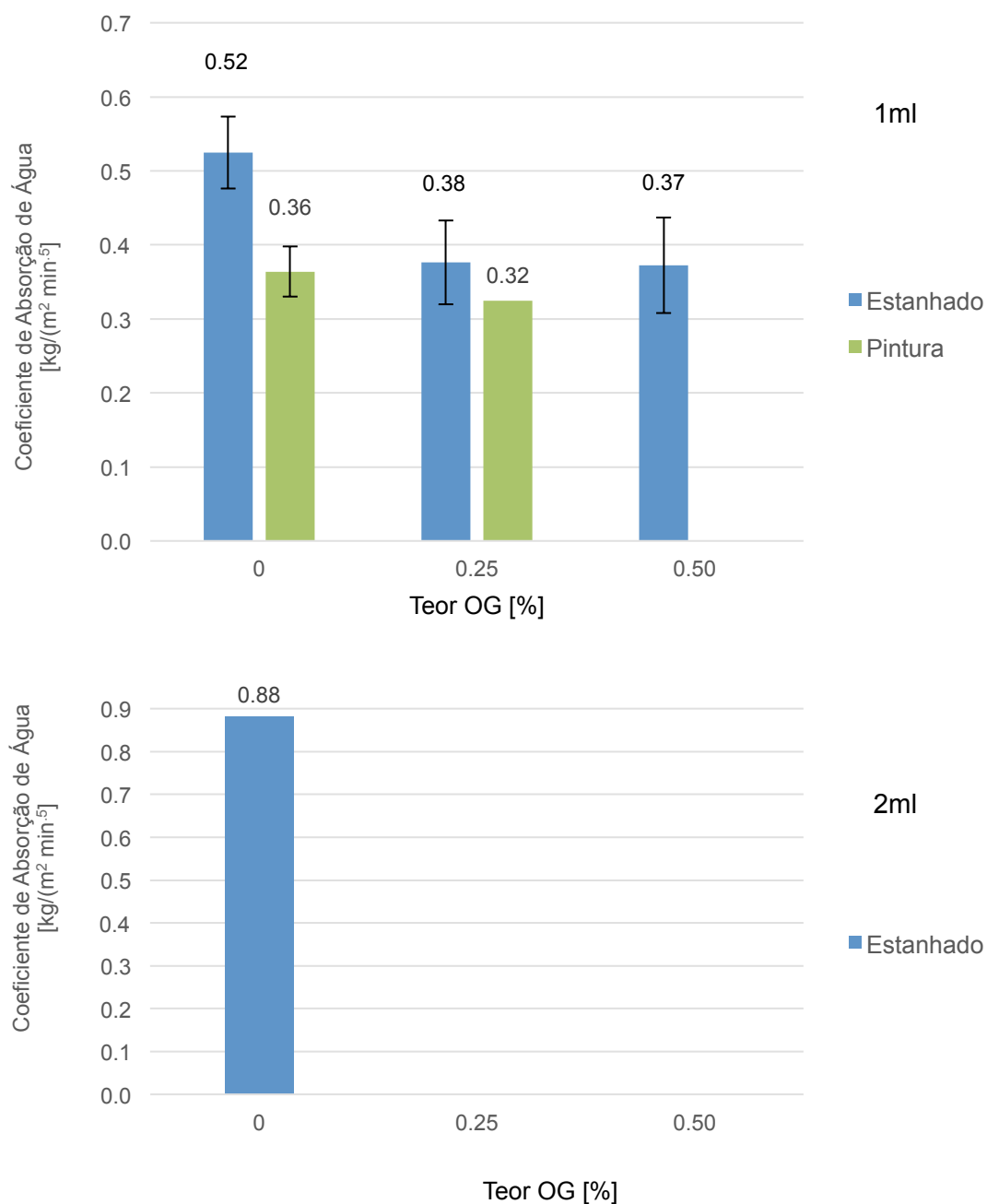


Figura 5.7 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água a baixa pressão para a pintura e o estanhado

Outra forma de demonstrar os resultados obtidos poderá ser através da inclusão dos resultados relativos aos níveis atingidos em cada tubo de Karsten, ao fim de uma hora, ponto que marca o término do ensaio. Esses resultados podem ser consultados na figura 5.8, em que os valores representados por cada barra representam as médias de valores anteriormente referidas. Note-se também que valores mais elevados representam um nível mais baixo no tubo de Karsten e consequentemente, uma maior quantidade de água absorvida.

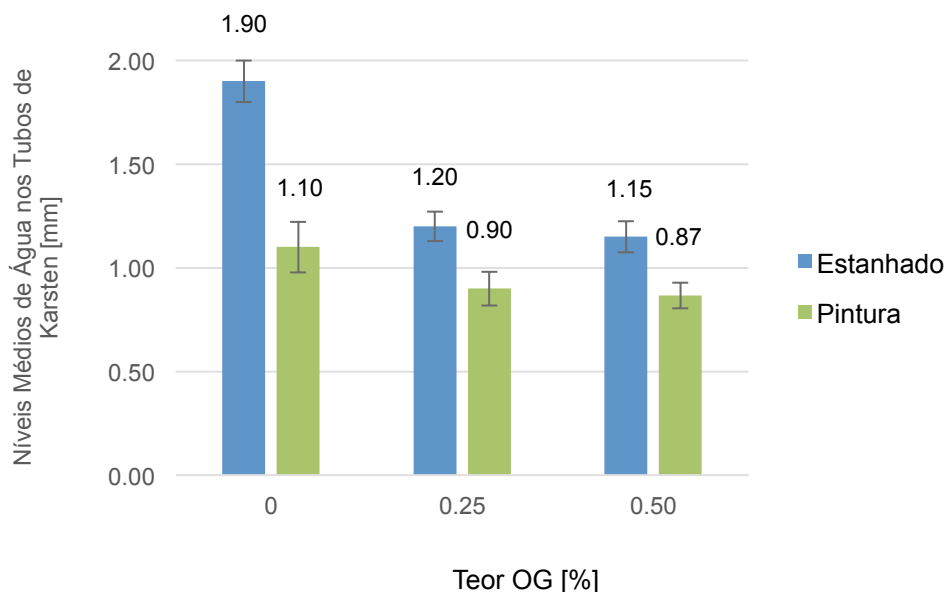


Figura 5.8 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água a baixa pressão ao fim de 60 minutos

O facto de se ter recorrido à versão alternativa da norma, porque os intervalos de tempo estipulados para o registo do nível nos tubos indicavam sempre sensivelmente o mesmo nível, por si só já é uma boa demonstração da lentidão de absorção dos produtos de acabamento em estudo. Para além disso, uma observação dos resultados obtidos demonstra que de todas as categorias de provetes em estudo apenas aqueles relacionados com o estanhado sem adição de OG ultrapassaram o nível 1ml, tendo todos os outros ficado acima desse nível, absorvendo então muito pouca água. Pode-se portanto concluir, de uma forma geral, que se está na presença de um material pouco permeável à água líquida, restando analisar as diferenças de comportamento entre os dois produtos de acabamento e entre os variados teores de adição de OG. Nesse aspeto, denota-se um decréscimo do coeficiente de absorção de água à medida que o teor de aditivo aumenta, significando por isso que o OG ajudou a melhorar as características de impermeabilização dos produtos de acabamento.

A observação de que o estanhado foi o único produto de acabamento que atingiu a marca dos 2ml pode ser enganadora, dado que por motivos que já foram referidos, o estanhado apresentou alguma fendilhação da sua superfície motivada pela aplicação de apenas uma demão de material. Essa fendilhação, que no caso da permeabilidade ao vapor de água aumentou os valores a favor do estanhado face à pintura, neste caso poderá ter conferido ao estanhado uma permeabilidade um pouco maior à água líquida, quando comparado com o caso da pintura. Tal como no caso da permeabilidade ao vapor de água, neste caso a água também terá tendência a procurar o caminho de menor esforço, aproveitando assim as fendas da superfície do estanhado e fazendo um *bypass* à atuação do OG, fazendo com que não se possa confiar totalmente nos resultados obtidos, sendo que em teoria deverão ser um pouco inferiores neste caso. Considera-se que esta afirmação é válida apesar de apenas os provetes sem a adição de OG terem ultrapassado a marca dos 2ml, pois os valores obtidos para os outros provetes assim poderão também estar ligeiramente alterados devido a

este fenómeno. Em todo o caso, a confirmar-se esta teoria, todos os valores obtidos neste ensaio para os provetes estanhados deveriam resultar em valores de absorção de água ligeiramente inferiores, no caso de um acabamento livre de fendilhação.

A média dos níveis de água dentro dos tubos ao fim de uma hora é também bastante representativa da influência do OG, sendo que a um aumento da sua percentagem correspondem níveis de água absorvida cada vez menores. Este resultado vai ao encontro do que era esperado, uma vez que o OG, com a sua capacidade para preencher poros macroscópicos e microscópicos, confere uma maior compacidade ao material, aumentando as suas características de impermeabilidade.

5.10 FT-IR

A análise deste ensaio consiste na identificação dos picos presentes no espectro FT-IR. Neste caso, o espectro será composto por picos referentes à pasta de cal aérea e ao OG, uma vez que se tratam dos constituintes da amostra. Tal como foi dito no capítulo 4.3.9, se a pequena amostra que é raspada da superfície do provete para análise contiver picos de OG na sua constituição, então isso significa que a dispersão desse aditivo foi homogénea em toda a superfície e assim, dados e resultados subsequentes obtidos em ensaios efetuados no provete podem ser atribuídos ao OG. Essa certeza é também conferida pelo facto de entre as séries de provetes apenas se alterar a quantidade de OG, sendo que para a pintura e estanhado, todos os outros parâmetros são mantidos constantes, ou seja, o material usado é o mesmo, o método de produção dos produtos de acabamento e a sua aplicação foram os mesmos, bem como a cura dos provetes.

A identificação dos picos presentes no espectro de FT-IR pode ser complicada. Por isso, utilizou-se um artigo científico de Lanas et. al, (2005) para ajudar nesse processo. Esse artigo em particular apresenta espectros de FT-IR de amostras puras de cal aérea em pasta, o que permite cruzar essa informação com a do espectro de FT-IR das amostras de cal aérea em pasta e OG, por forma a procurar os picos do aditivo, sendo que esses picos serão aqueles que não estarão nos espectros de FT-IR de Lanas et. al, (2005). Como auxiliar neste processo utilizou-se ainda um espectro de FT-IR correspondente a OG puro, o que permite identificar também picos desse material nos espectros das amostras de pintura e estanhado. De seguida apresenta-se na figura 5.9, tanto o espectro de FT-IR correspondente à pasta de cal aérea, como o que se refere ao OG. Chama-se a atenção para o facto de geralmente os espectros de FT-IR poderem ser apresentados com a transmitância ou a absorvância em ordenadas, sendo que no caso de Lanas et. al, (2005) se tem a transmitância em ordenada, o que significa apenas que o espectro se encontra ao contrário e que os picos observados nos outros espectros corresponderão aos vales que podem ser vistos no espectro de Lanas et. al, (2005). Na figura 5.10 podem posteriormente ser observados os espectros de FT-IR obtidos para os provetes deste estudo.

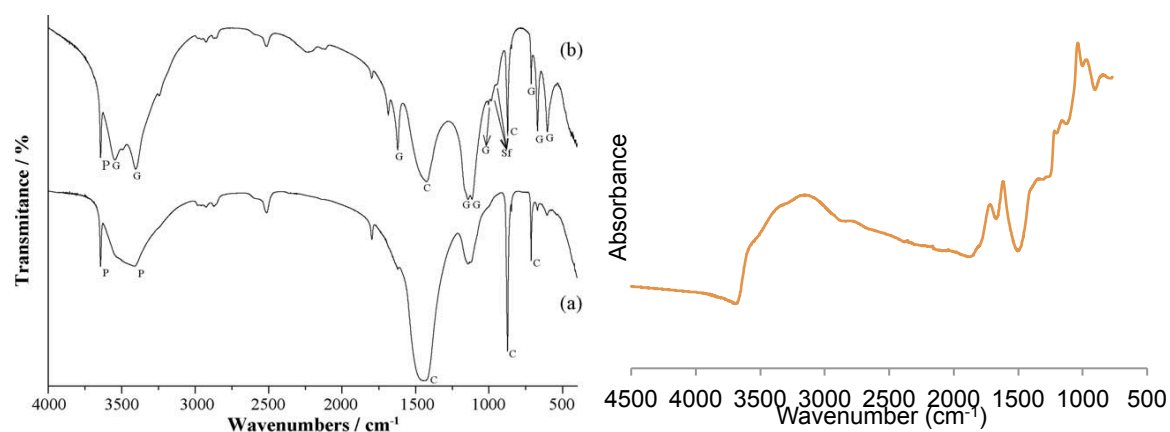


Figura 5.9 – Espectros de FT-IR da cal em pasta (Lanas et. al, 2005) e de OG puro

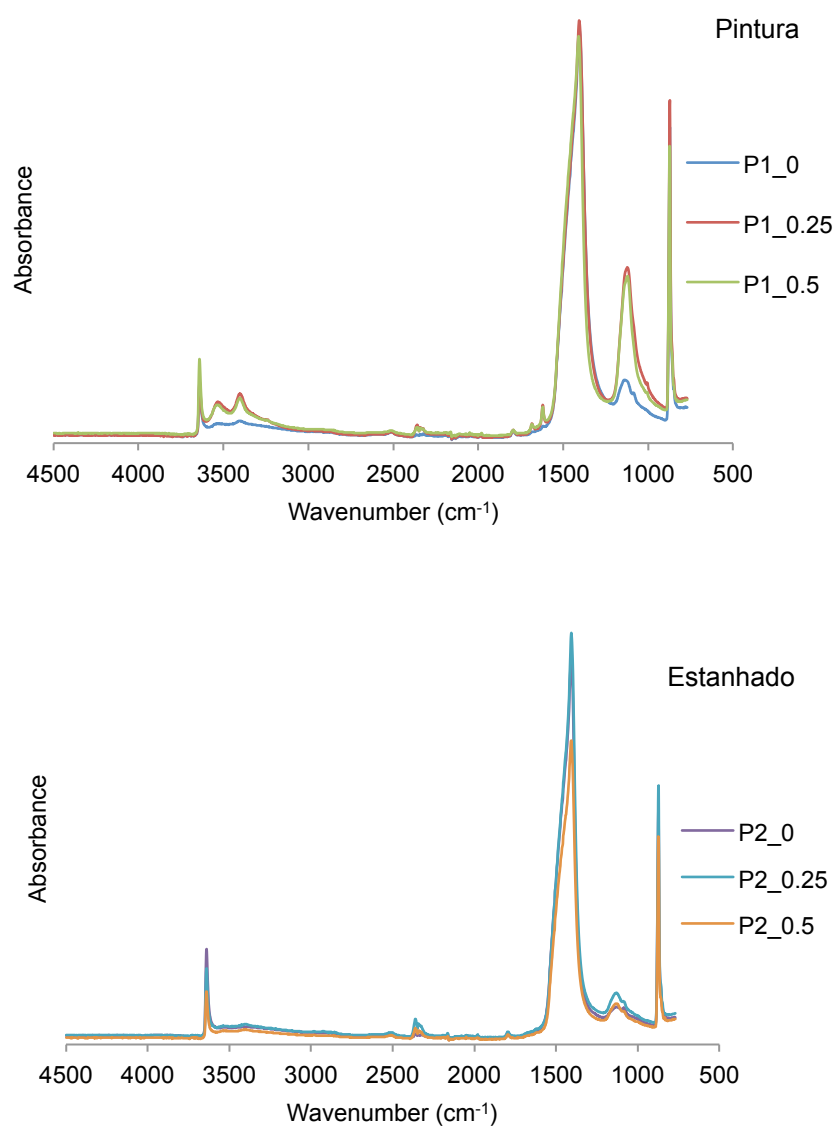


Figura 5.10 – Espectros de FT-IR obtidos para os vários provetes

Seguindo esta premissa, estudaram-se então os espectros obtidos e algumas conclusões puderam ser retiradas. Começando com uma observação da figura 5.10, podem-se observar picos bem definidos nas zonas dos 700, 1100, 3400 e 3600 cm^{-1} . Esses picos podem ser observados também no espectro de FT-IR de Lanas et. al, (2015) e correspondem à presença de calcite, hidróxido de cálcio e grupos hidroxil, sendo que todos estes são devidos à presença da cal aérea em pasta. De seguida pode-se observar que no espectro de FT-IR referente ao OG existe uma bossa na zona dos 3000 a 3500 $[\text{cm}^{-1}]$ que é característica desse tipo de material, sendo que no espectro da pintura existe também um pico nessa zona que poderá ser atribuído à presença do OG. No entanto, no caso do estanhado não existe nenhum pico nessa zona e essa inexistência leva a que não se possa concluir nada para esse produto de acabamento. Isso pode ser atribuído ao facto de no caso do estanhado a dispersão de OG não ser tão boa, o que pode levar a que ao se ter raspado uma zona da superfície do provete para análise, não se tenha apanhado uma zona com OG na sua constituição. É de notar que o ensaio de FT-IR geralmente é utilizado em amostras compostas por apenas um tipo de constituinte e, assim, geralmente não há o problema da uniformidade que se coloca neste caso em que não se pode ter a certeza se a zona raspada contém, ou não, OG.

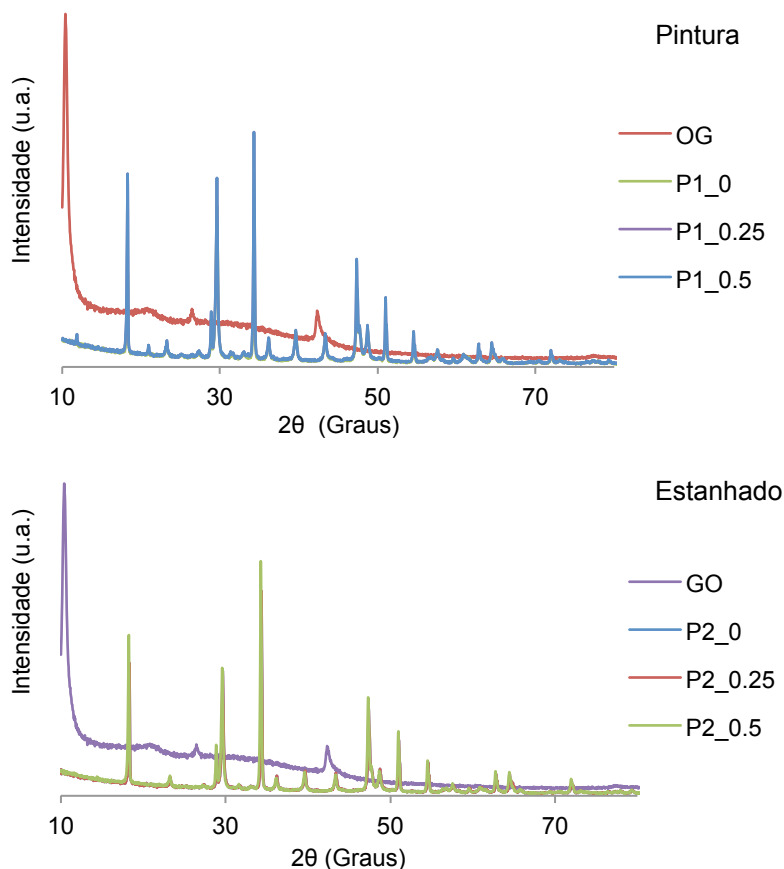
Outra observação digna de nota é o facto de haverem ligeiros desvios nos picos comparados entre este estudo e o de Lanas et. al (2005). Essa ligeira discrepância poderá estar associada ao facto de para este estudo se ter efectuado FT-IR em modo ATR, enquanto que no outro se efectuou FT-IR normal. Outro comentário deve ser feito ao facto de, para as várias percentagens de OG, os picos mais elevados, ou seja, aqueles que correspondem à presença da cal aérea, estarem todos ao mesmo nível, o que faz com que exista uma boa consistência dos resultados e uma garantia de que os espectros obtidos para a pintura e estanhado podem ser interpretados, fornecendo conclusões fidedignas.

Em conclusão, os resultados para a pintura vão ao encontro dos obtidos em estudos anteriores e apresentam OG no seu espectro, o que faz com que se possa confiar que as alterações das características funcionais obtidas nos produtos de acabamento foram obtidas à custa da adição de OG uniformemente disperso nos produtos de leite de cal. Já no caso do estanhado, não se pode concluir que as alterações nessas características não foram causadas pelo OG, uma vez que uma recolha de amostra ligeiramente ao lado talvez tivesse relevado OG no espectro.

5.11 XRD

À semelhança do que acontece com o FT-IR, a interpretação dos resultados associados a este ensaio passa pela identificação dos picos visíveis nos espectros que são obtidos no final. Cada espectro refere-se a um tipo de produto de acabamento, com uma determinada percentagem de OG e, nesse sentido, compararam-se os espectros resultantes deste ensaio com espectros de XRD que podem ser observados na figura 5.11, espectros esses que constam do artigo de Lanas et. al, (2005).

Nesse estudo utilizaram apenas cal aérea nas amostras, pelo que se esperava encontrar os mesmos picos, mas com a aparição de picos extra relacionados com o OG. De facto, os picos relativos à cal aérea estão todos presentes e coincidem perfeitamente com os picos que foram obtidos em Lanas et. al, (2005). No entanto, em todos os casos, os picos relacionados com o OG encontram-se ausentes, mesmo naqueles em que o seu teor é máximo, sendo então de referir que o ensaio de XRD apenas revelou picos referentes à cal aérea. Um exemplo concreto disso são os picos de calcite (C), portlandite (P) e etringite (E) que são visíveis nos espectros. Todos esses picos estão associados à cal aérea, sendo que se pode observar pela figura 5.11 que todos eles coincidem perfeitamente, ao ponto de uma sobreposição de gráficos de várias amostras não revelar nenhum tipo de desvio. Há também uma consistência entre este estudo e o de Lanas et. al (2005), sendo que faltam apenas os picos do OG, tal como se pode confirmar pela figura 5.11 que mostra também uma sobreposição dos espectros da pintura e do estanhado com o espectro do OG puro. Pode-se até referir que os picos característicos do OG se encontram coincidentes com as zonas mais baixas dos espectros que foram obtidos neste estudo. Uma possível explicação para esta ocorrência poderá estar relacionada com o facto de a percentagem de OG nas amostras ser diminuta, o que faz com que o equipamento de análise não consiga detectar os picos, uma vez que este tipo de análise geralmente é utilizada em materiais mais puros e homogêneos e, portanto, com uma estrutura mineralógica mais fácil de analisar.



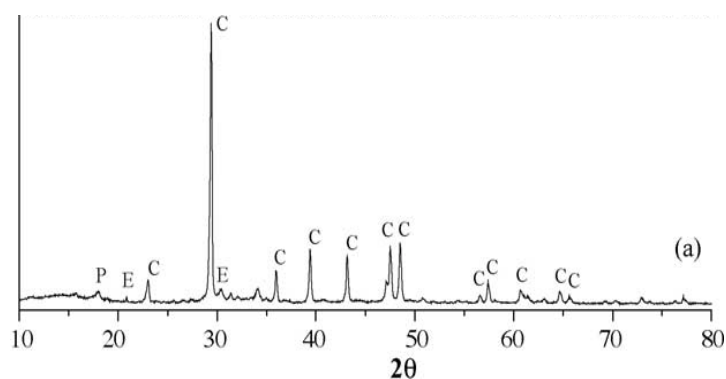


Figura 5.11 – Espectros de XRD das amostras de pintura, de estanhado e de apenas cal aérea em pasta (Lanas et. al., 2005)

5.12 Ângulo de Contacto

O ensaio do ângulo de contato não forneceu valores que pudessem ser analisados, uma vez que a absorção da gota de água por parte do suporte se dá com uma velocidade demasiado elevada. Resta apenas concluir que este tipo de superfície é demasiado hidrófila e que o ensaio em questão poderá não ser a melhor alternativa para caracterizar este tipo de material.

5.13 Síntese

Para facilitar a leitura e consulta rápida, inclui-se nesta secção uma súmula concisa dos resultados obtidos. Os valores gerais podem ser consultados nos quadros 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5.

Quadro 5.2 – Valores médios e desvio-padrão de fissuração por retração, resistência ao desgaste e resistência ao arrancamento

	% OG	Fissuração		Resistência Desgaste		Resistência Arrancamento	
		Abertura Fendas [mm]	Desv. Pad. [mm]	Média Massa Material Arrancado [g]	Desv. Pad. [g]	Média Força Arrancamento [KPa]	Desv. Pad. [KPa]
Caiação	P1_0	0	0	0,043	0,012	1,17	0,44
	P1_0.25	0	0	0,047	0,012	23,21	12,08
	P1_0.5	0	0	0,047	0,016	21,86	-
Estanhado	P2_0	0,045	0,006	0,053	0,012	19,91	-
	P2_0.25	0,048	0,008	0,067	0,016	92,24	-
	P2_0.5	0,045	0,008	0,050	0,008	106,41	-

Quadro 5.3 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de resistência à flexão

		Flexão			
		Abertura Fendas [mm]		Desv. Pad. [mm]	
	% OG	500 [mm]	250 [mm]	500 [mm]	250 [mm]
Caiação	P1_0	0,05	3,5E-18	0,20	13,8E-18
	P1_0.25	0,05	3,5E-18	0,16	0,02
	P1_0.5	0,07	0,01	0,16	0,02
Estanhado	P2_0	0,08	0,01	0,24	0,02
	P2_0.25	0,08	0,01	0,16	0,02
	P2_0.5	0,07	0,01	0,14	0,02

Quadro 5.4 – Valores médios e desvio-padrão dos ensaios de dureza e coesão superficiais

		Coesão Superficial		Dureza Superficial	
		Média Massa Material Arrancado [g]	Desv. Pad. [g]	Média Leitura Durómetro [Shore A]	Desv. Pad. [Shore A]
	% OG				
Caiação	P1_0	0,0053	0,0018	87,3	2,4
	P1_0.25	0,0050	0,0008	88,0	2,4
	P1_0.5	0,0043	0,0016	90,7	1,6
Estanhado	P2_0	0,0073	0,0016	93,7	1,2
	P2_0.25	0,0063	0,0012	94,0	0,8
	P2_0.5	0,0043	0,0004	93,3	1,0

Quadro 5.5 – Valores médios e desvio-padrão do ensaio de absorção de água

		Absorção Água					
		Cabs (1ml)		Cabs (2ml)		Níveis (1h)	
	% OG	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	0,364	0,034			1,10	0,244
	P1_0.25	0,325				0,90	0,164
	P1_0.5					0,87	0,124
Estanhado	P2_0	0,525	0,048	0,881		1,90	0,200
	P2_0.25	0,376	0,056			1,20	0,142
	P2_0.5	0,373	0,062			1,15	0,150

5.14 Tendências

Em adição à síntese já feita, considera-se importante nesta secção avaliar algumas das tendências que foram observadas ao longo do tratamento dos resultados dos ensaios. Irá de seguida proceder-se a essa avaliação, no entanto, esta apenas será feita para os casos em que se puderam observar tendências claras na evolução dos resultados.

Começando pelo ensaio de arrancamento, pode-se observar uma tendência clara de aumento da tensão de arrancamento, com aumento do teor de OG. A reta de tendência obtida permite extrapolar os resultados obtidos para resultados futuros, obtidos com teores de OG superiores. Note-se no entanto que a reta não passa no intervalo definido pelo desvio-padrão em cada um dos três pontos, o que pode levar a uma determinada falta de precisão na previsão desses resultados. Na figura 5.12 encontram-se as retas de tendência obtidas para este ensaio.

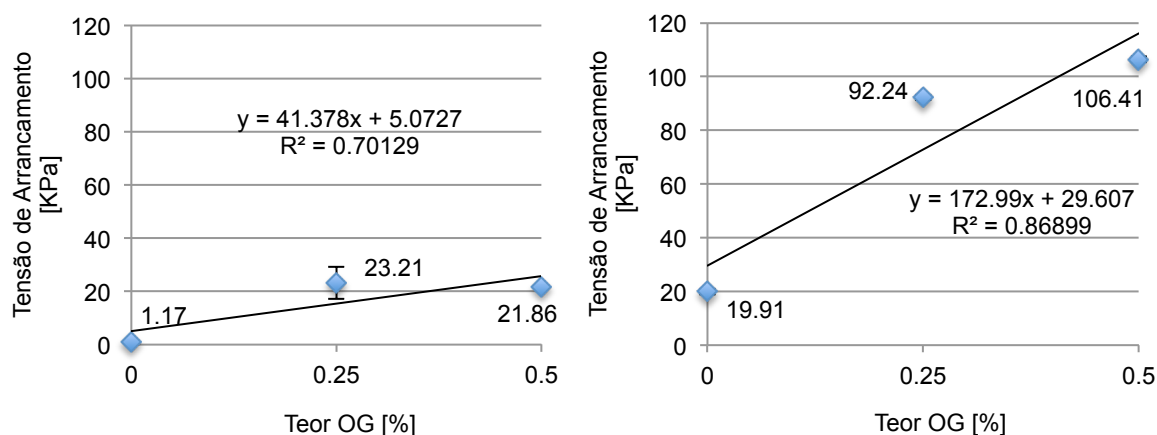


Figura 5.12 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de arrancamento (Pintura à esquerda e estanhado à direita)

Para o caso do ensaio de flexão as retas de tendência apontam para melhorias dos valores em todos os casos, exceto para o caso da pintura, situação na qual o raio mais gravoso parece conduzir a um aumento da média da abertura de fendas. Será expectável assim que para teores de OG superiores aos testados neste estudo, possivelmente se continuem a verificar melhorias de resultados. Já neste caso, ao contrário do que se observou no ensaio de arrancamento, as linhas de tendência aproximam-se mais das zonas definidas pelo desvio-padrão em cada um dos três pontos, o que confere uma maior confiança nas previsões que estão para lá dos 0.5% de OG. A figura 5.13 inclui as retas de tendência obtidas dos resultados deste ensaio.

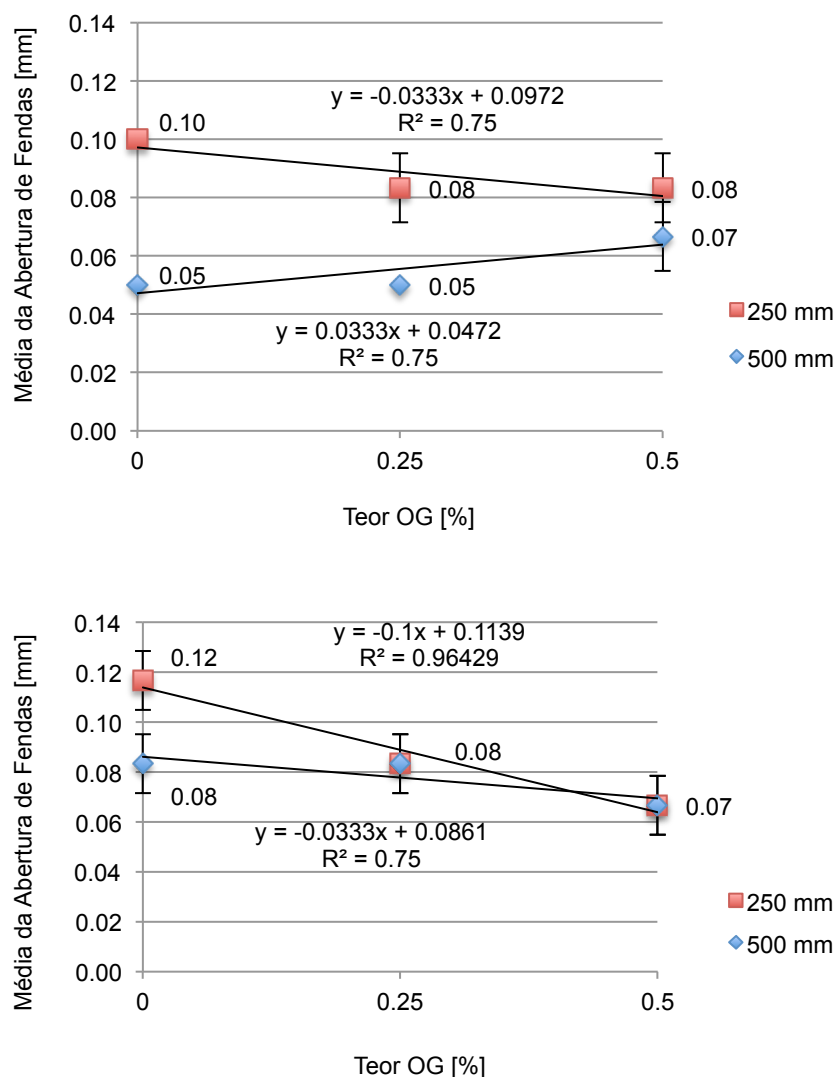


Figura 5.13 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de flexão (Pintura em cima e estanhado em baixo)

Os resultados de coesão e dureza superficiais indicam também perspectivas de melhoria dos resultados para teores incrementais de OG. No caso da dureza superficial apenas se fez este estudo para a pintura, uma vez que o estanhado não apresentou nenhuma tendência clara. No caso destes dois ensaios, as retas de tendência apresentam-se perfeitamente enquadradas nos intervalos do desvio-padrão. Tendo em conta o que se pode observar nas retas obtidas, será possível que os resultados continuem a melhorar para lá dos 0.5% de OG. As figuras 5.14 e 5.15 apresentam as retas de tendência obtidas nestes dois casos.

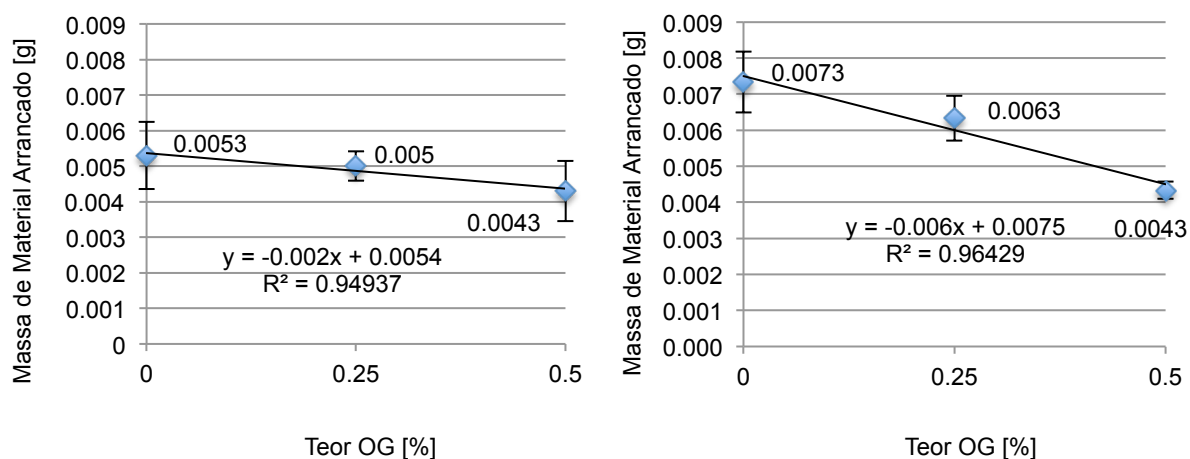


Figura 5.14 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de coesão superficial (Pintura à esquerda e estanhado à direita)

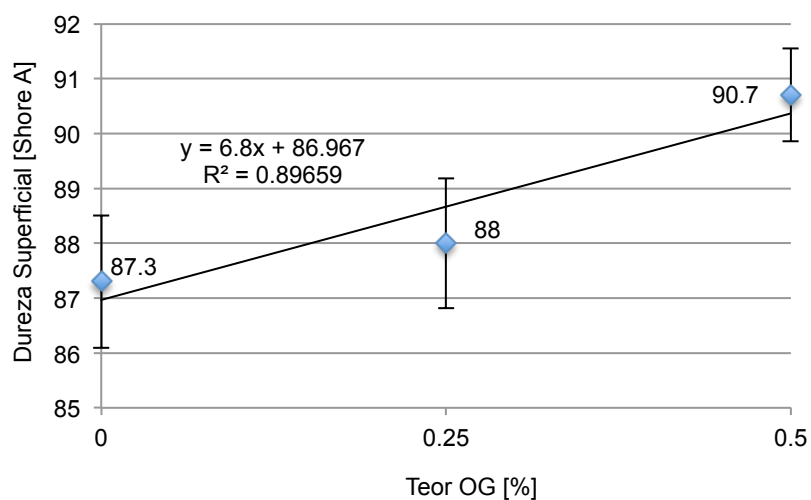


Figura 5.15 – Reta de tendência dos resultados para o ensaio de dureza superficial (Pintura)

Para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi também possível obter uma reta de tendência que, uma vez mais, demonstra uma possível melhoria de resultados para teores superiores de OG. Essa reta pode ser observada na figura 5.16 e foi obtida apenas para o caso da pintura, uma vez que o estanhado não forneceu uma tendência clara neste ensaio.

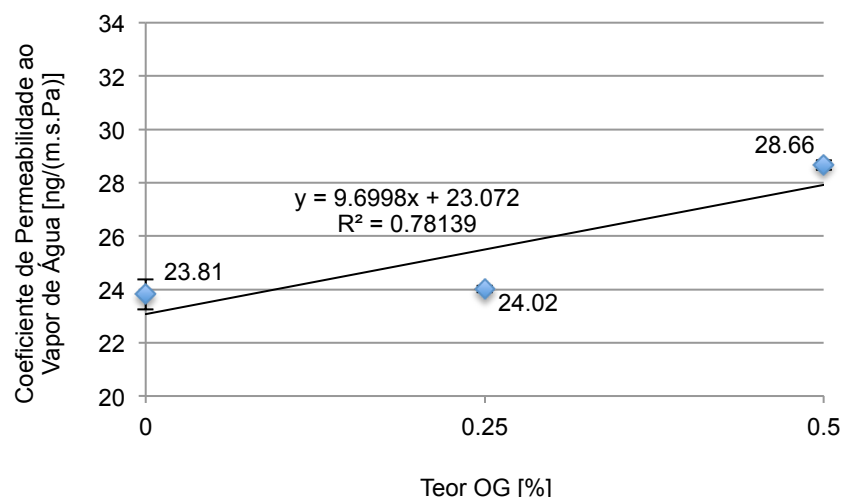


Figura 5.16 – Reta de tendência dos resultados para o ensaio de permeabilidade ao vapor de água (Pintura)

Para terminar, analisando o caso do ensaio de absorção de água sob baixa pressão, obtiveram-se duas retas de tendência favoráveis à melhoria de resultados futuros com teores superiores de OG. Pode-se ver também que as melhorias induzidas pelo OG foram mais acentuadas no caso do estanhado e que nesse caso, a linha de tendência se afasta um pouco das zonas delineadas pelo desvio-padrão, o que de certa forma diminui a confiança nas perspectivas de melhoria de resultados com teores de OG superiores a 0.5%. As retas obtidas para este ensaio podem ser observadas na figura 5.17.

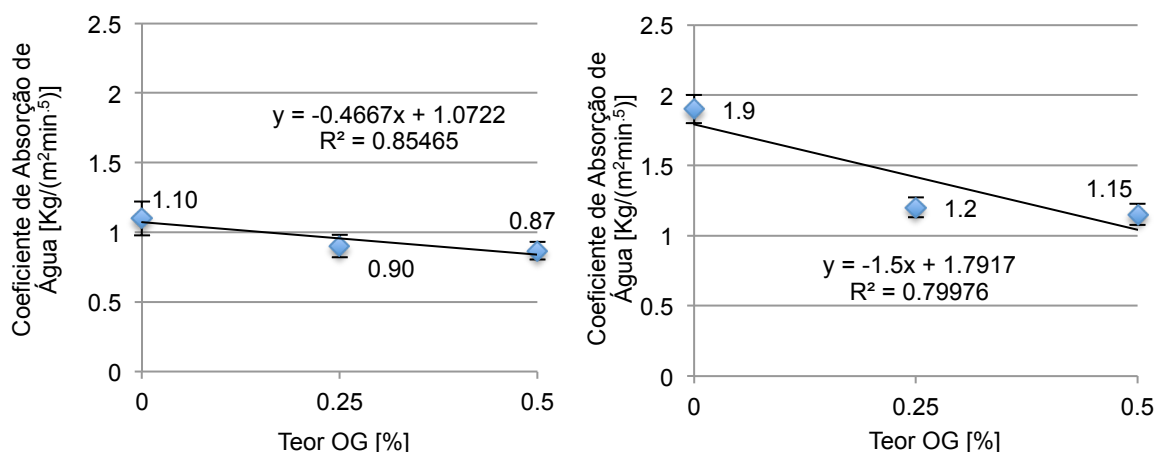


Figura 5.17 – Retas de tendência dos resultados para o ensaio de absorção de água a baixa pressão (Pintura à esquerda e estanhado à direita)

6 CONCLUSÕES

6.1 Conclusões Gerais

A temática relacionada com os nanomateriais tem sido hoje em dia cada vez mais estudada. A sua popularização tem trazido sobre estes uma maior atenção, o que naturalmente resulta em novos avanços com eles relacionados. A banalização deste tema leva também a um decréscimo no custo de obtenção desses nanomateriais, como no caso do OG, material que apesar de ainda ser considerado caro já se encontra hoje por preços mais acessíveis do que há uma década atrás. Alguns destes nanomateriais, no que a várias indústrias diz respeito, podem representar a chave que desbloqueia o progresso e abre um leque de novas opções que podem levar a um novo patamar de conhecimento e pesquisa. Foi nesse sentido que se efetuou este estudo, tirando partido das características únicas que este tipo de materiais apresenta.

Tendo em conta o facto de este tipo de estudo ser relativamente recente, encontraram-se dificuldades em comparar os resultados obtidos com resultados obtidos por outros investigadores, uma vez que ainda pouco ou nada há acerca da aplicação de OG, ou até de nanomateriais em geral, no campo de pesquisa relacionado com os produtos de acabamento à base de cal aérea. Contudo, acha-se importante e satisfatório que, com esta investigação, se tenham lançado algumas bases de comparação para estudos futuros, uma vez que os dados obtidos com um estudo, por mais rigorosa que tenha sido a preparação e execução em laboratório, ganham outro tipo de credibilidade quando podem ser confirmados por outros estudos semelhantes, efetuados e reproduzidos pelos mesmos métodos e materiais, mas realizados por outros investigadores.

De uma forma extremamente abrangente, a adição do OG foi benéfica, tendo-se obtido resultados satisfatórios, com exceção de alguns casos em que a adição de OG foi indiferente, querendo isto dizer que na pior das hipóteses o OG não se fez notar, sendo que não houve nenhum caso em que se tivesse dado uma deterioração das características funcionais dos produtos de acabamento como consequência desta adição. Posto isto, será necessário prosseguir com a análise da influência do OG nas características funcionais de produtos de acabamento à base de cal aérea, se possível seguindo algumas das sugestões que serão dadas no capítulo 6.3, sugestões essas dadas com base na experiência adquirida no decorrer desta dissertação.

Uma nota merecedora de particular destaque nesta secção é o facto de se terem obtido resultados bastante positivos em todo o tipo de ensaios relacionados com características físicas superficiais, nomeadamente a dureza e coesão superficiais, bem como a resistência ao arrancamento. Outro ensaio onde se obtiveram valores positivos importantes foi o da absorção de água a baixa pressão. Referem-se estes resultados aqui porque o OG possui um tamanho de partícula extremamente reduzido e, como consequência, uma elevada superfície específica, o que à partida lhe permite preencher os vazios do material, não apenas os poros de elevadas dimensões, como também os poros microscópicos, o que torna o material mais compacto e naturalmente mais

resistente a este tipo de solicitação à superfície. Esse aumento de compacidade como consequência do preenchimento dos poros do material também ajuda a que este se torne obviamente menos poroso e menos permeável à água no estado líquido, contribuindo assim para a melhoria das suas características funcionais de impermeabilidade. Há no entanto que somar a isto o facto de o OG ser um nanomaterial caracterizado pela sua hidrofobicidade, factor esse que contribuiu também para os resultados obtidos.

6.2 Conclusões Principais

Terminada esta dissertação, considera-se que os objetivos propostos no início deste texto foram atingidos. Conseguiram-se avaliar todos os parâmetros que se pretendiam, em alguns casos tendo de recorrer a métodos menos convencionais, mas que permitiram avançar com o estudo e que, em última análise, permitiram obter resultados onde à partida se pensava que não seria possível, tal como foi o caso do ensaio de arrancamento ou também do ensaio de flexão.

Foi extremamente interessante avaliar de que forma o OG influenciou as características funcionais dos produtos de acabamento que se estudaram. Inerentes a este pormenor estão também as várias percentagens de OG que se utilizaram, tendo sido bastante revelador o facto de se poderem ter comparado amostras de controlo sem OG, com amostras com teores crescentes deste aditivo. Nesse capítulo, há várias ilações que podem ser tiradas e que serão de seguida listadas.

Para começar, o OG não será um bom controlador de fendilhação; crê-se que a sua adição não será suficiente para corrigir ou minorar problemas associados a essa temática, uma vez que, nos resultados obtidos, a sua adição não ajudou a melhorar esse tipo de característica dos produtos de acabamento. Nesse caso, qualquer tipo de controlo de fendilhação deverá ser garantido por outra metodologia que não a adição de OG. Este resultado foi particularmente evidente no caso do estanhado, situação onde ocorreu de facto fendilhação e esta não pôde ser controlada, nem com a presença de OG na constituição do produto de acabamento, nem com o aumento do teor desse aditivo. Já no caso da pintura, o número de demãos dadas foi consideravelmente superior e, como tal, a tendência para a fendilhação foi nula, quer nos provetes de controlo, quer naqueles aditivados com o OG. Nesta situação pode-se evidenciar que o OG não contribuiu para o aparecimento de fendilhação, sendo que não piorou esse aspeto nos provetes pintados.

No caso da resistência ao desgaste, a influência do OG foi indiferente ou nula. Os provetes apresentaram uma resistência intrínseca a este tipo de solicitação, resistência essa que não foi afetada particularmente pelo aditivo. Resta evidenciar uma vez mais que o OG não diminuiu de forma nenhuma a resistência própria que os provetes apresentaram à solicitação tangencial de desgaste, resultando em valores de massa de material arrancado por erosão que oscilam sem um padrão definido à medida que a percentagem de aditivo aumenta. No entanto, os valores oscilam em torno de valores não muito distintos, o que dá a ideia que não houve desvios de execução, sendo que o ensaio foi executado de forma homogénea para todos os provetes. A somar a este pormenor, quer-se acrescentar que os desvios-padrão baixos que se obtiveram vêm corroborar a ideia que o

procedimento experimental foi executado convenientemente e de forma padronizada para todos os provetes. Estas conclusões são válidas para o caso da pintura e do estanhado. Apesar de tudo, analisando os bons resultados obtidos em outros ensaios relacionados com dureza e coesão superficial, estava-se à espera que esse tipo de comportamento positivo à adição de OG fosse extensível ao caso da resistência à erosão, algo que não sucedeu e que apenas pode ser explicado pelo facto de, fundamentalmente, uma solicitação de desgaste rotativo e tangencial ser diferente fisicamente quando comparada com a solicitação aplicada nos casos da dureza e coesão superficiais. Daí não se poder esperar exatamente o mesmo tipo de comportamento entre ensaios, apesar de se tratarem de características físicas relativamente semelhantes.

No que toca ao ensaio de arrancamento, a conclusão principal a retirar é que o OG melhorou este tipo de resistência. A sua influência fez-se sentir nos provetes aditivados face aos de controlo e foi cada vez mais acentuada à medida que o teor de OG aumentou. Esta situação é válida para o caso da pintura e do estanhado. Há no entanto que relembrar que o número de provetes para ensaiar era não só era reduzido, como também foi diminuído por problemas relacionados com a execução do ensaio. Por essa razão para se ter a certeza desta influência positiva do OG convém confirmar estes resultados com mais ensaios efetuados sob as mesmas condições, com o uso dos mesmos materiais e utilizando a mesma metodologia. Há que referir que, ao contrário do que aconteceu com o ensaio de resistência ao desgaste, os resultados aqui obtidos são coniventes com os obtidos nos ensaios de coesão e dureza superficiais, dado que apontam para uma melhoria das características físicas superficiais dos provetes, como consequência da adição do OG.

Passando para a resistência à flexão, os valores obtidos são satisfatórios e demonstram, uma vez mais, os efeitos positivos do OG. Essa influência positiva fez-se sentir em quase todos os casos, à exceção do caso da pintura, onde se deu uma evolução desfavorável dos valores para o raio de 500mm e apenas uma ligeira melhoria no caso do raio de 250mm. Esta situação pode revelar um mau procedimento no que toca à aparafusagem dos provetes de pintura, uma vez que evolução desfavorável dos valores deveria ter sido verificada no caso do raio mais acentuado, ao passo que a melhoria ligeira deveria ter sido observada no caso do raio mais suave. Já no caso do estanhado, os valores são mais coerentes e apontam para uma melhoria no controlo da fendilhação por flexão, melhoria essa que é coincidente com o aumento do teor de OG. Estes resultados são consistentes com os resultados dos outros ensaios que registam uma melhoria das características superficiais dos produtos de acabamento em estudo.

O ensaio de coesão superficial foi talvez o que devolveu resultados mais inequívocos em relação à atuação do OG. Houve uma evolução positiva, homogénea entre ambos os produtos de acabamento e consistente entre as diversas percentagens de aditivo, ou seja, ambos os produtos de acabamento beneficiaram da adição do OG e esse benefício foi tanto maior quanto maior a percentagem de aditivo, características que resultaram numa gama de resultados com valores muito bem distribuídos e congruentes. Os valores positivos aqui obtidos vêm no seguimento dos resultados positivos obtidos no ensaio de arrancamento e servem para corroborar esses valores anteriormente obtidos, uma vez que o arrancamento e a coesão superficial estão intimamente ligados, permitindo

extrapolar conclusões entre estes dois ensaios. Lembra-se aqui que o OG possui características que lhe permitem melhorar este tipo de característica e que fazem com que este tipo de resultado seja bastante plausível.

Seguidamente, é importante abordar um pouco os resultados obtidos na parte da dureza superficial. Estes resultados são consistentes com os já apresentados para a maioria das características físicas superficiais, uma vez que também mostram uma evolução positiva que acompanha o aumento do teor de OG na constituição das amostras. Por esse motivo, estes resultados permitem concluir que, de facto, a dureza superficial aumentou, como consequência da adição do OG. Mas, acima de tudo, vêm cimentar as melhorias das características físicas superficiais, uma vez que todos os valores apontam no mesmo sentido, à exceção da resistência ao desgaste. Uma chamada de atenção deve ser feita ao facto de, neste caso e ao contrário daquilo que tem sido verificado ao longo do estudo, os valores não foram igualmente satisfatórios para o caso da pintura e do estanhado, querendo isto dizer que no caso do estanhado os valores se consideram inconclusivos, uma vez que não seguem nenhum padrão específico que aponte para melhorias relacionadas com a adição do OG. Este fenómeno é de difícil explicação e requer um estudo mais aprofundado que poderá ser esclarecido com estudos futuros. No entanto, no caso desta dissertação esse aprofundamento não pôde ser feito, por motivos relacionados com a quantidade de material disponível e a janela de oportunidade que apenas permite um determinado tempo para a campanha experimental em laboratório.

Abordando agora o ensaio de permeabilidade ao vapor de água, os resultados aqui obtidos são uma vez mais positivos para o caso da pintura, sendo que houve um aumento da permeabilidade ao vapor de água, enquanto que a redução que houve no caso do estanhado se pode considerar pouco significativa. Na apresentação dos resultados relacionados com este ensaio referiu-se que, no geral, a permeabilidade do estanhado ao vapor era superior à da pintura em todos os casos. Assim concluiu-se que o estanhado não apresenta melhorias com a introdução do OG porque, por si só, já é extremamente permeável. Como tal pode-se afirmar que o OG não inibiu a permeabilidade ao vapor de água que o estanhado já apresenta como característica própria.

Já no caso da absorção de água a baixa pressão, os resultados referentes à pintura são muito esclarecedores: a quantidade de água absorvida decresceu bastante, quando comparando a quantidade de água absorvida entre os provetes de controlo, sem OG, e os provetes com a percentagem máxima de adição de OG. Uma vez mais, a elevada superfície específica do OG, conjugada com o seu muito reduzido tamanho de partícula e hidrofobicidade estarão possivelmente na origem destes resultados, que acabam por ser reforçados pelos valores obtidos para as médias no nível dos tubos ao fim de uma hora de ensaio. Neste ensaio obtiveram-se valores muito positivos para o caso do estanhado, sendo que os valores de absorção de água decresceram de forma consistente e conivente com a adição de teores sucessivamente maiores de OG. Pôde notar-se que neste caso o nível de água chegou à marca dos 2ml, o que significa que houve maior absorção de água no caso do estanhado, face ao caso da pintura, mas apenas para o caso sem adição de OG. Faz-se então uma chamada de atenção semelhante à que já foi feita anteriormente quando se

abordou a questão dos resultados relativos ao ensaio de permeabilidade ao vapor de água, ou seja, a fendilhação que se deu na superfície do estanhado após a sua secagem poderá falsear de certa forma alguns dos resultados. Teoricamente falando, não se sabe se os valores obtidos representam realmente a contribuição que o OG tem para a permeabilidade à água no estado líquido, uma vez que a fendilhação abre um caminho que a água tem tendência a explorar para efetuar a passagem, tornando assim o produto de acabamento aditivado com OG numa área que não é testada com 100% de eficácia, algo que só aconteceria se todo o produto de acabamento fosse perfeitamente contínuo. É certo que a marca dos 2ml apenas foi ultrapassada no caso sem OG, mas isso faz com que os outros resultados possam ter sido também falseados, sendo que apesar de não terem chegado a essa marca, em teoria poderiam ter sido ainda inferiores. Seriam no entanto necessários ensaios adicionais para confirmar esta explicação.

No caso do FT-IR, os resultados para a pintura são favoráveis, sugerindo que o OG se encontra distribuído de forma consistente na superfície das amostras, o que faz com que se possam atribuir as alterações de características funcionais observadas, à adição desse nanomaterial. Já no caso do estanhado, o mesmo não pode ser dito, uma vez que, por causa da menor dispersão de OG que se consegue obter nesse meio, a amostra recolhida para ensaio FT-IR não tinha OG. Isso faz com que se conclua que o método utilizado para dispersão do OG na pasta de cal para o estanhado não foi eficiente.

Uma nota importante é o facto de os maus resultados obtidos no FT-IR, para o caso do estanhado, poderem ajudar a esclarecer os resultados inconclusivos obtidos nos ensaios de desgaste e de dureza superficial. A má distribuição do OG num meio mais consistente, tal como o estanhado, pode levar a esse tipo de resultados. No caso da dureza superficial, por exemplo, as medições com o durómetro são pontuais e portanto, podem incidir em pontos onde a dispersão de OG não tenha sido tão boa. No caso da erosão, a ação de desgaste é um pouco mais abrangente, mas ainda assim, uma má dispersão do aditivo pode conduzir também a resultados menos satisfatórios. Pensa-se, no entanto, que as indicações dadas pelo ensaio de FT-IR podem ajudar a esclarecer, sobretudo, os resultados inconclusivos do ensaio de dureza superficial, sendo que para o ensaio de desgaste se pensa que, apesar daquilo que os espectros de FT-IR mostram, a causa mais provável para os valores inconclusivos poderá estar relacionada mais com uma realização deficiente do ensaio e não tanto com a má dispersão do OG.

Terminando com o XRD, os resultados podem ser considerados inconclusivos, uma vez que não se conseguiram ver os picos relativos ao OG, o que era o fator mais importante. O facto de não se verem os picos não representa necessariamente um mau sinal, denotando em princípio uma inadequabilidade deste ensaio para caracterizar um material deste género, ou seja, um material com percentagens muito reduzidas no teor dos constituintes, sendo que em princípio seria necessário que a percentagem de OG no composto fosse superior, por forma a permitir que o equipamento o detetasse.

6.3 Estudos Futuros

Existem alguns aspectos que por motivos relacionados com a quantidade de material ou com a falta de tempo não puderam ser analisados nesta dissertação. Por exemplo, poderia ser importante analisar o comportamento do estanhado mais em pormenor, contudo, poderia ser igualmente vantajoso direccionar um futuro estudo na direcção do barramento, estudando o seu comportamento a este tipo de aditivos, uma vez que os resultados poderão ser ainda melhores. O barramento, apesar de muito semelhante ao estanhado, possui também na sua constituição um filler que pode ajudar a torná-lo mais compacto e menos propício à fendilhação, potenciando assim ainda mais a atuação do OG.

Em termos de ensaios realizados, considera-se que o estudo feito foi bastante completo, ainda assim, existe margem para um estudo mais aprofundado. Nomeadamente, poderia ser de interesse o estudo da estabilidade da cor, resistência deste tipo de produtos de acabamento quando confrontados com ciclos de raios UV, escorrência de água da chuva e análise de produtos lixiviados. Outra direcção a seguir poderia ser a dos produtos de acabamento pigmentados, ou seja, investigar de que forma o OG poderá ajudar estes produtos a manterem o seu aspeto, mais concretamente a integridade e homogeneidade da sua cor quando confrontados com ciclos de desgaste por UV e chuva, tal como sugerido anteriormente, sendo que todos os outros ensaios realizados neste estudo se mantêm relevantes para este caso também. No seguimento da sugestão dos produtos pigmentados, não se poderia deixar de referir os produtos à base de terra, produtos estes que também poderão ser testados quanto à sua pigmentação e que se mantêm também associados a um estudo que recaia sobre a construção tradicional e sustentável.

No que às percentagens de OG a adicionar aos produtos de acabamento se refere, pensa-se que as utilizadas neste estudo foram pertinentes. No entanto é de referir que em todos os casos em que se observou uma evolução positiva nas características dos produtos, como consequência da adição de OG, se observou essa melhoria apenas até uma percentagem de 0,5% de aditivo, valor esse que corresponde à percentagem máxima em estudo. Não se sabe o que ocorre para lá desse valor. Poderia ser assim de interesse, no futuro, estudar também percentagens de aditivo superiores a essa, uma vez que a tendência de melhoria pode-se verificar para lá dos 0,5% de aditivo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arandigoyen, M., & Alvarez, J. I. (2006). Blended pastes of cement and lime: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252, 8077–8085. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.10.019>
- Arandigoyen, M., Bernal, J. L. P., López, M. B., & Alvarez, J. I. (2005). Lime-pastes with different kneading water: Pore structure and capillary porosity. *Applied Surface Science*, 252, 1449–1459. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.02.145>
- Arandigoyen, M., Bicer-Simsir, B., Alvarez, J. I., & Lange, D. a. (2006). Variation of microstructure with carbonation in lime and blended pastes. *Applied Surface Science*, 252, 7562–7571. <http://doi.org/10.1016/j.apsusc.2005.09.007>
- CEN (2009) – EN 15803:2009. Conservation of cultural property – Test methods - Determination of water vapour permeability. Brussels.
- CEN (2013) – EN 16302:2013. Conservation of cultural heritage – Test methods - Measurement of water absorption by pipe method. Brussels.
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., & Duan, W. H. (2014). Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide. *Construction and Building Materials*, 73, 113–124. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.040>
- Diaz Gonçalves, T., Brito, V., & Musacchi, J. (2014). The whole and the parts: Can lime coatings enhance the drying of salt laden materials? *Construction and Building Materials*, 57, 179–189. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.007>
- Gong, K., Asce, S. M., Pan, Z., Korayem, A. H., Ph, D., Qiu, L., Asce, A. M. (2015). Reinforcing Effects of Graphene Oxide on Portland Cement Paste, 1–6. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001125](http://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001125).
- Horszczaruk, E., Mijowska, E., Kalenczuk, R. J., Aleksandrak, M., & Mijowska, S. (2015). Nanocomposite of cement/graphene oxide – Impact on hydration kinetics and Young's modulus. *Construction and Building Materials*, 78, 234–242. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.009>
- Huldén, M., & Hansen, C. M. (1985). Water permeation in coatings. *Progress in Organic Coatings*, 13, 171–194. [http://doi.org/10.1016/0033-0655\(85\)80025-X](http://doi.org/10.1016/0033-0655(85)80025-X)
- Karoglou, M., Bakolas, A., Moropoulou, A., & Papapostolou, A. (2013). Effect of coatings on moisture and salt transfer phenomena of plasters. *Construction and Building Materials*, 48, 35–44. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.06.050>
- Krishnamoorthy, K., Jeyasubramanian, K., Premanathan, M., Subbiah, G., Shin, H. S., & Kim, S. J. (2014). Graphene oxide nanopaint. *Carbon*, 72, 328–337. <http://doi.org/10.1016/j.carbon.2014.02.013>
- Lv, S., Ma, Y., Qiu, C., Sun, T., Liu, J., & Zhou, Q. (2013). Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites. *Construction and Building Materials*, 49, 121–127. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.08.022>
- Matias, G., Faria, P., & Torres, I. (2014). Lime mortars with heat treated clays and ceramic waste: A review. *Construction and Building Materials*, 73, 125–136. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.09.028>

- Nicodemo, L., Bellucci, F., Marcone, a., & Monetta, T. (1990). Water and oxygen transport as performance parameters of paint films. *Journal of Membrane Science*, 52, 393–403. [http://doi.org/10.1016/S0376-7388\(00\)85139-X](http://doi.org/10.1016/S0376-7388(00)85139-X)
- Pan, Z., He, L., Qiu, L., Korayem, A. H., Li, G., Zhu, J. W., Wang, M. C. (2015). Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite. *Cement and Concrete Composites*, 58, 140–147. <http://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.02.001>
- | Šadauskiene, J., Stankevičius, V., Bliudžius, R., & Gailius, A. (2009). The impact of the exterior painted thin-layer render's water vapour and liquid water permeability on the moisture state of the wall insulating system. *Construction and Building Materials*, 23, 2788–2794. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.03.010>
- Shahriary, L., & Athawale, A. (2014). Graphene Oxide Synthesized by using Modified Hummers Approach. *International Journal of Renewable Energy and Environmental Engineering*, 02(01), 58–63.
- Taylor, P., & Stankevi, V. (n.d.). Journal of Civil Engineering and Management The Durability of Paints On Sand-Lime Brick Walls Considering Water Sorption And Vapour Permeability In a Two-Layer System, (February 2015), 37–41. <http://doi.org/10.1080/13923730.2003.10531313>
- Topsakal, M., Aahin, H., & Ciraci, S. (2012). Graphene coatings: An efficient protection from oxidation. *Physical Review B - Condensed Matter and Materials Physics*, 85, 1–7. <http://doi.org/10.1103/PhysRevB.85.155445>

ANEXO - Valores individuais dos ensaios efetuados e cálculos auxiliares

Quadro A1.1 – Ensaio de avaliação da fissuração

		[mm]							
	% OG	Bolachas			Resto da Placa			Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0		
	P1_0.25	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0		
	P1_0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
		0	0	0	0	0	0		
Estanhado	P2_0	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,045	0,006
		0,04	0,05	0,04	0,04	0,05	0,03		
	P2_0.25	0,05	0,05	0,05	0,05	0,06	0,05	0,048	0,007
		0,05	0,04	0,05	0,04	0,05	0,03		
	P2_0.5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,045	0,007
		0,03	0,04	0,05	0,04	0,03	0,05		

Quadro A1.2 - Ensaio de erosão e desgaste

		Peso Inicial [g]			Peso Final [g]		
	% OG	1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa	1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa
Caiação	P1_0	282,06	321,15	270,17	282,03	321,11	270,11
	P1_0.25	245,56	221,67	243,12	245,51	221,61	243,09
	P1_0.5	249,36	253,48	251,15	249,29	253,45	251,11
Estanhado	P2_0	325,46	281,96	281,86	325,41	281,92	281,79
	P2_0.25	300,09	237,78	255,5	300,03	237,73	255,41
	P2_0.5	242,3	246,29	253,83	242,25	246,23	253,79

		Diferença de Peso [g]				
	% OG	1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa	Média [g]	Desv. Pad. [g]
Caiação	P1_0	0,03	0,04	0,06	0,043	0,012
	P1_0.25	0,05	0,06	0,03	0,047	0,012
	P1_0.5	0,07	0,03	0,04	0,047	0,016
Estanhado	P2_0	0,05	0,04	0,07	0,053	0,012
	P2_0.25	0,06	0,05	0,09	0,067	0,016
	P2_0.5	0,05	0,06	0,04	0,050	0,008

Quadro A1.3 – Ensaio de arrancamento

	% OG	[N]			[Kpa]				
		1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa	1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa	Média	Desv. Pad.
Caição	P1_0	1,6	3,6	1,88	0,79	1,79	0,93	1,175	0,44
	P1_0.25	44,2	77,5	18,19	22,00	38,58	9,06	23,213	12,08
	P1_0.5	43,9			21,80			21,864	
Estanhado	P2_0	40,0			19,91			19,91	
	P2_0.25	180,1	190,5	25,74	89,66	94,83		92,24	
	P2_0.5	194,0	233,5		96,58	116,24		106,41	

Quadro A1.4– Cálculos auxiliares

	Diâmetro [mm]	Média [mm]	Área Pastilha [mm ²]
d1	50,43	50,57	2008,78
d2	50,65		
d3	50,64		

Quadro A1.5 – Ensaio de flexão

	% OG	[mm]									
		500 mm			250 mm			500 mm		250 mm	
		1ª Fenda	2ª Fenda	3ª Fenda	1ª Fenda	2ª Fenda	3ª Fenda	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Caição	P1_0	0,05	0,05	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	7,0E-18	0,10	13,8E-18
	P1_0.25	0,05	0,05	0,05	0,10	0,05	0,10	0,05	7,0E-18	0,08	2,4E-02
	P1_0.5	0,05	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,07	2,4E-02	0,08	2,4E-02
Estanhado	P2_0	0,10	0,05	0,10	0,10	0,15	0,10	0,08	2,4E-02	0,12	2,4E-02
	P2_0.25	0,10	0,10	0,05	0,10	0,10	0,05	0,08	2,4E-02	0,08	2,4E-02
	P2_0.5	0,05	0,10	0,05	0,05	0,10	0,05	0,07	2,4E-02	0,07	2,4E-02

Quadro A1.6– Ensaio de coesão superficial

	% OG	Peso Total [g]			Diferença de Peso [g]			Média [g]	Desv. Pad. [g]
		1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa	1ª Placa	2ª Placa	3ª Placa		
Caição	P1_0	0,103	0,099	0,099	0,008	0,004	0,004	0,005	0,0018
	P1_0.25	0,100	0,101	0,099	0,005	0,006	0,004	0,005	0,0008
	P1_0.5	0,101	0,097	0,100	0,006	0,002	0,005	0,004	0,0016
Estanhado	P2_0	0,103	0,104	0,100	0,008	0,009	0,005	0,007	0,0018
	P2_0.25	0,101	0,103	0,100	0,006	0,008	0,005	0,006	0,0012
	P2_0.5	0,099	0,100	0,099	0,004	0,005	0,004	0,004	0,0004

Quadro A1.7– Cálculos auxiliares

Condições	
Área Pressionada	50 cm ²
Tempo Pressão	5 min.
Peso Aplicado	5 Kg
Peso fita (5cm ²)	0,095 g

Quadro A1.8 – Ensaio de dureza superficial

		[Shore A]						
	% OG	1ª Placa					Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	86	87	87	88	86	86,8	0,748
	P1_0.25	90	89	85	87	87	87,6	1,744
	P1_0.5	90	89	89	92	92	90,4	1,356
Estanhado	P2_0	93	94	95	92	95	93,8	1,166
	P2_0.25	95	94	95	93	94	94,2	0,748
	P2_0.5	94	93	92	92	92	92,6	0,800

		[Shore A]						
	% OG	2ª Placa					Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	87	82	92	88	86	87	3,225
	P1_0.25	92	88	84	86	91	88,2	2,993
	P1_0.5	92	89	90	89	92	90,4	1,356
Estanhado	P2_0	95	92	93	93	95	93,6	1,200
	P2_0.25	95	94	94	93	94	94	0,632
	P2_0.5	93	95	94	95	92	93,8	1,166

		[Shore A]						
	% OG	3ª Placa					Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	89	85	91	86	90	88,2	2,315
	P1_0.25	85	87	90	91	88	88,2	2,135
	P1_0.5	91	90	89	92	95	91,4	2,059
Estanhado	P2_0	94	92	94	95	93	93,6	1,020
	P2_0.25	93	93	95	94	94	93,8	0,748
	P2_0.5	93	93	93	95	94	93,6	0,800

Quadro A1.9 - Valores da medição da espessura dos provetes

Espessura dos Provetes						
		e [mm]				e _{médio} [m]
		e1	e2	e3	e4	
0%	P1	10,27	10,21	10,24	10,27	0,0103
	P2	10,33	10,29	10,26	10,28	
	P3	10,34	10,20	10,21	10,36	
	E1	13,50	13,49	13,59	13,47	0,0135
	E2	13,41	13,56	13,50	13,72	
	E3	13,53	13,41	13,85	13,39	
0.25%	P1	10,16	10,15	10,35	10,12	0,0102
	P2	10,05	10,09	10,15	10,14	
	P3	10,35	10,22	10,15	10,34	
	E1	13,05	13,15	13,17	13,06	0,0131
	E2	12,89	12,81	12,92	12,90	
	E3	13,43	13,16	13,32	13,25	
0.50%	P1	12,96	12,87	13,00	12,91	0,0129
	P2	12,87	13,02	12,96	12,97	
	P3	12,97	12,88	12,81	12,90	
	E1	13,41	13,21	13,17	13,30	0,0134
	E2	13,57	13,41	13,49	13,39	
	E3	13,27	13,47	13,43	13,49	

Quadro A1.10 - Valores da medição da área superficial de ensaio

Área Superficial de Ensaio			
Medições [mm]		Média [mm]	A [m ²]
d1	92,31	92,145	0,0044
d2	91,98		
e1	8,65	8,63	
e2	8,69		
e3	8,58		
e4	8,6		

Quadro A1.11 - Cálculos auxiliares

Diferencial de Pressão (Δp)		
T (°C)	23	23
HR (%)	50	100
P _s (Pa)	2806	2806
P (Pa)	1403	2806
Δp (Mpa)	1403	

Permeabilidade ao Vapor de Água	
p_0 (hPa)	1013,25
p (hPa)	28,06
T (K)	296,15
R [Nm/(kg.K)]	462
δa [kg/(m.s.Pa)]	7,06E-09

Quadro A1.12- Valores registados nas medições do ensaio de permeabilidade ao vapor de água

	Data	17/07/2015	20/07/2015	21/07/2015	22/07/2015	23/07/2015	24/07/2015
	Hora	16:00	10:30	10:30	10:30	12:30	10:30
	t (s)	0	239400	325800	412200	505800	585000
		m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)
	P1	762,250	758,877	757,693	756,634	755,301	754,285
0%	Δm ₁ (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	P2	751,958	748,465	747,236	746,124	744,732	743,670
	Δm ₂ (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	P3	811,712	808,064	806,692	805,431	803,937	802,850
	Δm ₃ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009
	E1	390,021	386,156	384,855	383,686	382,293	381,193
	Δm ₁ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009
	E2	393,607	389,988	388,680	387,517	386,092	384,986
	Δm ₂ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009
	E3	396,451	392,993	391,793	390,693	389,360	388,319
	Δm ₃ (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	Δm _i (Kg)	0	0,0035	0,0048	0,0059	0,0073	0,0084
	Δm _i (Kg)	0	0,0036	0,0049	0,0061	0,0074	0,0085
		m ₀ (g)	m ₁ (g)	m ₂ (g)	m ₃ (g)	m ₄ (g)	m ₅ (g)
0,25%	P1	389,981	386,350	385,067	383,902	382,487	381,384
	Δm ₁ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009
	P2	399,300	395,677	394,391	393,234	391,818	390,716
	Δm ₂ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009
	P3	395,912	392,358	391,105	389,965	388,587	387,507
	Δm ₃ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
	E1	387,996	384,499	383,294	382,197	380,852	379,809
	Δm ₁ (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	E2	824,469	820,792	819,497	818,347	816,936	815,833
	Δm ₂ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009
	E3	865,053	861,525	860,279	859,146	857,776	856,709
	Δm ₃ (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,007	0,008
	Δm _i (Kg)	0	0,0036	0,0049	0,0060	0,0074	0,0085
	Δm _i (Kg)	0	0,0035	0,0048	0,0059	0,0073	0,0083

		m_0 (g)	m_1 (g)	m_2 (g)	m_3 (g)	m_4 (g)	m_5 (g)
0,50%	P1	380,837	377,511	376,366	375,269	373,968	372,953
	Δm_1 (Kg)	0,000	0,003	0,004	0,006	0,007	0,008
	P2	368,446	365,039	363,833	362,733	361,398	360,354
	Δm_2 (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	P3	377,981	374,555	373,352	372,259	370,928	369,884
	Δm_3 (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	E1	399,606	396,195	394,992	393,891	392,567	391,531
	Δm_1 (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	E2	808,775	805,337	804,115	803,006	801,657	800,606
	Δm_2 (Kg)	0,000	0,003	0,005	0,006	0,007	0,008
	E3	773,477	769,925	768,533	767,292	765,907	764,798
	Δm_3 (Kg)	0,000	0,004	0,005	0,006	0,008	0,009
	Δm_i (Kg)	0	0,0034	0,0046	0,0057	0,0069	0,0080
	Δm_i (Kg)	0	0,0035	0,0047	0,0059	0,0072	0,0083

Quadro A1.13- Cálculos auxiliares

		G (kg/s)	W _p [kg/(m ² .s.Pa)]	δ _p				S _d		
				[kg/(m.s.Pa)]	[ng/(m.s.Pa)]	Média	dp	(m)	Média	dp
0%	P1	1,36E-08	2,20E-09	2,26E-11	22,60	23,81	1,12	3,210	3,05	0,14
	P2	1,42E-08	2,29E-09	2,35E-11	23,52			3,085		
	P3	1,52E-08	2,46E-09	2,53E-11	25,31			2,867		
	E1	1,51E-08	2,44E-09	3,30E-11	32,97	31,88	1,08	2,900	3,00	0,10
	E2	1,47E-08	2,38E-09	3,23E-11	32,27			2,963		
	E3	1,39E-08	2,25E-09	3,04E-11	30,40			3,145		
0,25%	P1	1,47E-08	2,38E-09	2,42E-11	24,21	24,02	0,25	2,973	3,00	0,03
	P2	1,47E-08	2,37E-09	2,42E-11	24,17			2,978		
	P3	1,44E-08	2,32E-09	2,37E-11	23,67			3,042		
	E1	1,40E-08	2,26E-09	2,96E-11	29,60	30,34	0,67	3,125	3,05	0,07
	E2	1,47E-08	2,39E-09	3,12E-11	31,23			2,962		
	E3	1,43E-08	2,31E-09	3,02E-11	30,20			3,063		
0,50%	P1	1,35E-08	2,18E-09	2,82E-11	28,17	28,66	0,35	3,242	3,19	0,04
	P2	1,38E-08	2,24E-09	2,89E-11	28,91			3,159		
	P3	1,38E-08	2,24E-09	2,89E-11	28,91			3,159		
	E1	1,38E-08	2,23E-09	2,99E-11	29,87	30,79	1,05	3,165	3,07	0,10
	E2	1,40E-08	2,26E-09	3,02E-11	30,22			3,128		
	E3	1,49E-08	2,41E-09	3,23E-11	32,27			2,930		

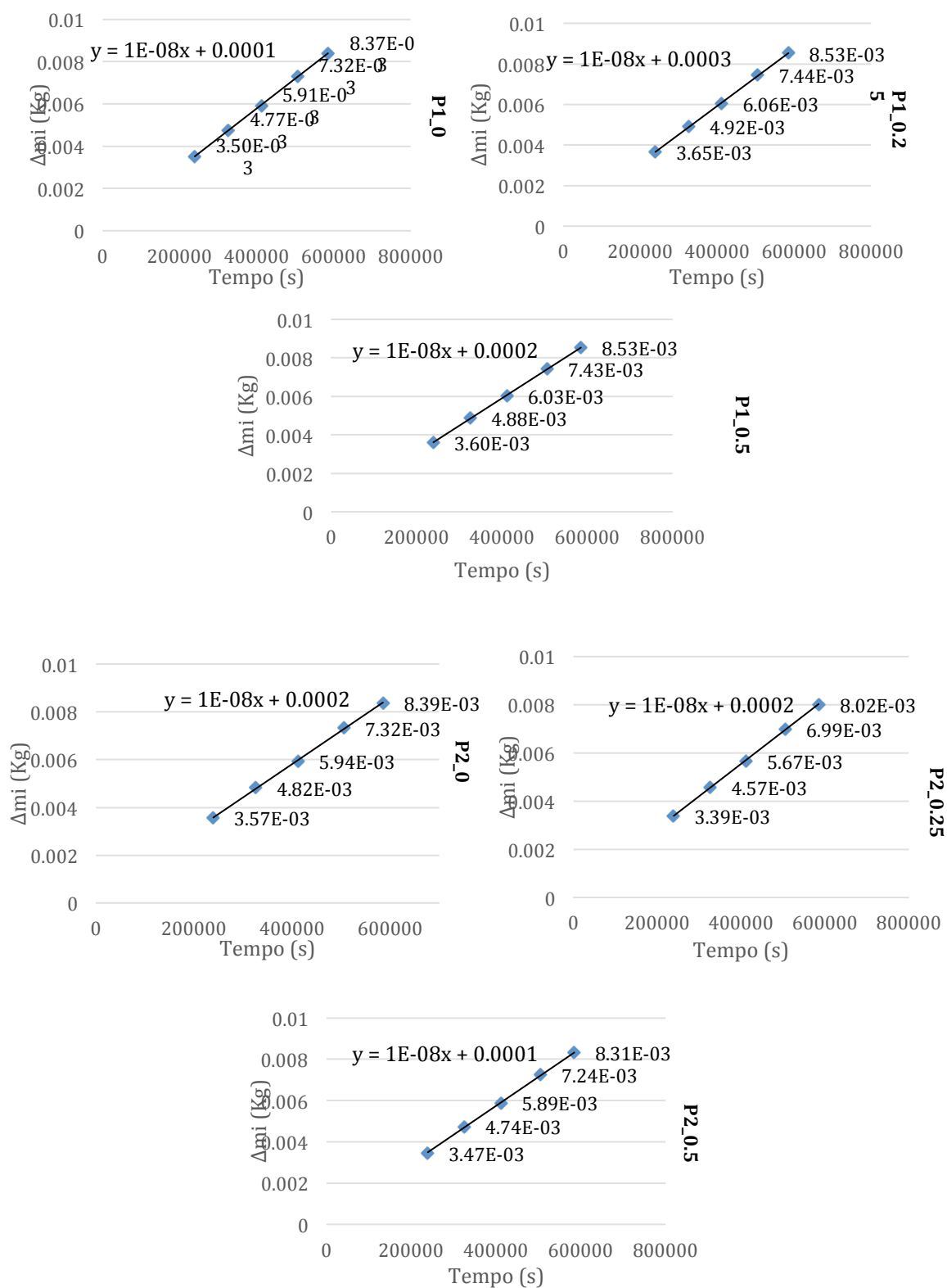


Figura A1.1 - Retas de transferência de vapor de água

Quadro A1.14 - Valores das leituras nos tubos de Karsten

0% OG	1			2			3		4		1h (Nível)
	s	m^0.5		s	m^0.5		s	m^0.5		s	
Caiação	2690	6,696	0,330								1,1
	1855	5,560	0,398								1,4
											0,8
Média	0,364										1,1
Desv. Pad.	0,034										0,24
Estanhado	1293	4,642	0,476								1,7
	892	3,856	0,573	1510	5,017	0,881					2,1
	Fuga										
Média	0,525			0,881							1,9
Desv. Pad.	0,049			0							0,2

0.25% OG	1			2			3			4			1h (Nível)
	s	m^0.5		s	m^0.5		s	m^0.5		s	m^0.5		
Caiação													0,9
	2782	6,809	0,325										1,1
													0,7
Média			0,325										0,9
Desv. Pad.			0,000										0,16
Estanhado	2451	6,391	0,346										1,1
	2744	6,763	0,327										1,1
	1412	4,851	0,456										1,4
Média			0,376										1,2
Desv. Pad.			0,057										0,14

0.50% OG	1			2			3			4			1h
	s	m^0.5		s	m^0.5		s	m^0.5		s	m^0.5		(Nível)
Caiação													0,7 0,9 1
Média													0,87
Desv. Pad.													0,12
Estanhado	3092	7,179	0,308										1
	1534	5,056	0,437										1,3
	Fuga												
Média			0,373										1,15
Desv. Pad.			0,065										0,15

Quadro A1.15 - Valores dos níveis nos tubos de Karsten (Fim de 1h)

		[ml]	
	% OG	Média (Níveis 1h)	Desv. Pad. (Níveis 1h)
Caiação	P1_0	1,10	0,24
	P1_0.25	0,90	0,16
	P1_0.5	0,87	0,12
Estanhado	P2_0	1,90	0,20
	P2_0.25	1,20	0,14
	P2_0.5	1,15	0,14

Quadro A1.16 - Médias dos níveis nos tubos de Karsten ao longo do ensaio

		[ml]							
		1ml		2ml		3ml		4ml	
		Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.	Média	Desv. Pad.
Caiação	P1_0	0,364	0,034						
	P1_0.25	0,325							
	P1_0.5								
Estanhado	P2_0	0,525	0,049	0,881	0				
	P2_0.25	0,376	0,057						
	P2_0.5	0,373	0,065						